

Stuur LEDs en energiebesparing bij paprika

Onderzoek in de praktijk bij VOF Dingemans

Elly Nederhoff, Patricia de Boer, Ad Schapendonk, Sander Pot & Tom Dueck





Stuur LEDs en energiebesparing bij paprika

Onderzoek in de praktijk bij VOF Dingemans

Elly Nederhoff¹, Patricia de Boer¹, Ad Schapendonk², Sander Pot² & Tom Dueck¹

Met medewerking van:

Margreet Bruins¹, Dik Uenk¹, Johan Steenhuizen¹, Jan Snel¹, Leo Marcelis¹, Frank Kempkes¹, Athanasios Sapounas¹, Steven Driever¹, Wouter Verkerke¹, Mary Warmenhoven¹ & Hans Janssen¹

¹ WUR glastuinbouw

² Plant Dynamics BV

© 2010 Wageningen, Wageningen UR Glastuinbouw

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Wageningen UR Glastuinbouw

PT_nummer 13417



Ministerie van Landbouw, Natuur en
Voedselkwaliteit



Wageningen UR Glastuinbouw

Adres : Droevendaalsesteeg 1, 6708 PB Wageningen
: Postbus 16, 6700 AA Wageningen
Tel. : 0317 - 48 60 01
Fax : 0317 - 41 80 94
E-mail : glastuinbouw@wur.nl
Internet : www.glastuinbouw.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

Deel 1: Onderzoek in de praktijk

1	Samenvatting	3
2	Inleiding	7
3	Proefopzet	9
4	Lichtmetingen	13
5	Vegetatieve groei	19
6	Productie	27
7	Temperatuur gradiënten	37
8	Evaluatie	45
9	Referenties	47
	Bijlage I. Details plantwaarnemingen	49
	Bijlage II. Bepaling LAI	55
	Bijlage III. Belichtings Effectiviteit	57
	Bijlage IV. Foto's	59
	Bijlage V. Drogestofgehalte vruchten tijdens ontwikkeling	63

Deel 2: Scenario analyses LED en SONT

1	Samenvatting	75
2	Proces analyse	77
3	Source processen	84
4	Sink processen	95
5	Scenario analyses	97

Deel 1:

Onderzoek in de praktijk

1 Samenvatting

Kader

In een praktijkproef met paprika in seizoen 2008/2009 is LED belichting vergeleken met SON-T belichting. Het onderzoek vond plaats bij Vof Dingemans in Vierpolders en werd uitgevoerd door Wageningen UR glastuinbouw en Plant Dynamics BV, en gefinancierd door PT en LNV in het kader van het programma 'Kas als Energiebron'. Wij bedanken Wim en Stefan Dingemans voor de proefneming, Ad Schapendonk en Sander Pot (Plant Dynamics BV) voor de goede samenwerking, Dennis Medema (PT), Leo Opvel (LNV) en Matthijs Beelen (LTO) voor vruchtbare discussies, en Jeroen van Velzen (Lemnis Lighting BV) voor technische input.

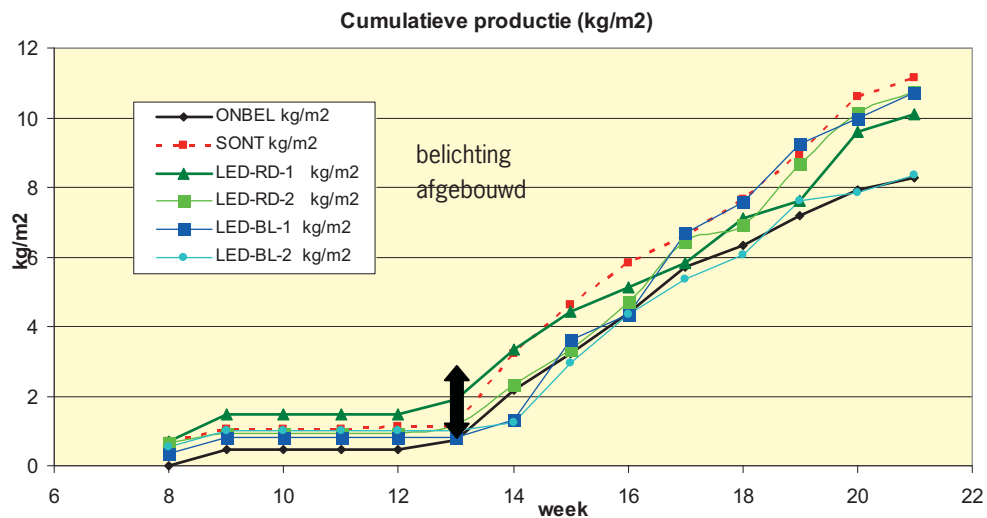
Doel en proefopzet

Doel van de proef was vast te stellen of LED een stuurlichteffect heeft op paprika, d.w.z. of het monochromatisch karakter van LED-licht bepaalde effecten op de morfologie en ontwikkeling van de paprikaplant heeft, zelfs bij vrij lage lichtintensiteit.

De proefvelden met LED belichting lagen in de productiekas bij vof Dingemans. Het ras was Derby, zaaidatum 13 oktober 2008, plantdatum 24 november, plantdichtheid 2,5 plant/m², en stengeldichtheid 7,5 per m².

Er lagen zes proefvakken: een vak van 560 m² met SON-T belichting (**SON-T**) en een groot vak 'Onbelicht' (**ONBL**). Vier proefvakken van 120 m² (15 x 8 m) waren uitgerust met LEDs: twee met rode LEDs (**RD**) en twee met blauwe LEDs (**BL**). Bij beide LED kleuren waren er twee varianten die verschilden in belichtingsperiode. In LED behandelingen **RD-1** en **BL-1** was de belichtingsperiode 8:00 tot 16:00 uur. Behandelingen **RD-2** en **BL-2** hadden tot 27 januari een lange belichtingsperiode (4:00-16:00 uur), vervolgens een heel korte belichtingsperiode (8:00-12:00 uur), en vanaf eind maart werd belicht van 6:30 tot 9 uur, plus eventueel een paar uur in de middag. LEDs waren watergekoelde systemen afkomstig van Lemnis Lighting BV. Overigens bevatten rode LED lampen ook bijna 5% blauw licht om goede plantontwikkeling te waarborgen.

De intensiteit van het SON-T licht was bij de kop van het gewas ca 45 micromol/m²/s in december en ca 52 micromol/m²/s in april (doordat de planten groeiden kwamen ze dichterbij de lampen). De intensiteit van de rode LEDs was vergelijkbaar, namelijk ca 46 micromol/m²/s op gewashoogte. De LED lampen werden regelmatig hoger gehangen zodat ze steeds ongeveer 150 cm boven het gewas bleven hangen. De blauwe LEDs hadden een veel lagere intensiteit van ca 17 micromol/m²/s.



Figuur 1. Cumulatieve productie (kg/m²).

Groei, zetting en productie

Productie was aanvankelijk het hoogst bij RD-1, op afstand gevolgd door SON-T en RD-2, en het laagst bij ONBL, BL-1 en BL-2. De belichting werd beëindigd rond 10 april 2009 (week 15). De cumulatieve productie op dat moment was het hoogst in SON-T, gevolgd door RD-1 (rode LED belichting 8:00-16:00 uur). De andere vier behandelingen hadden een lagere productie (ONBL, RD-2, BL-1 en BL-2). Maar rond 21 mei (week 21), circa 6 weken na afbouwen van de belichting was de cumulatieve productie van BL-1 en RD-2 bijna net zo hoog geworden als die van de SON-T.

Bij paprika wisselen vruchtgroei en vegetatieve groei elkaar af. Planten bij RD toonden vanaf het begin een behoorlijk goede zetting en productie, waardoor de groei van stengels en bladeren minder was. Bij BL was de zetting aanvankelijk moeizaam, en de vroege productie matig, maar de vegetatieve groei was (daardoor) beter. In april/mei was het bladoppervlak in BL-1 zelfs 44% groter dan bij SON-T. De betere lichtopvang in BL-1 verklaart de hoge productie op het eind en na beëindiging van het belichtingsseizoen.

De vroege zetting bij BL-1 was weliswaar matig, maar toch een week eerder dan bij ONBL. Mogelijk werd zetting vooral door lichtintensiteit bepaald: door de kleine hoeveelheid extra licht kon BL de zetting enigszins bevorderen. Het grote bladoppervlak in BL-1 kan een gevolg zijn van twee zaken: niet alleen de beschikbaarheid van assimilaten vanwege matige zetting, maar ook het 'schaduwbladeffect'. D.w.z. dat bij weinig licht (zoals bij BL en ONBL) bladeren dunner en groter worden, zodat ze meer licht opvangen. Planten bij BL-1 kregen meer licht dan die in ONBL en konden daarom langer worden en meer bladoppervlak aanmaken dan die bij ONBL. Voor verdere discussie van de mechanismen en lichtkleureffecten: zie deel 2.

Stuurlichteffect?

In deze proef waren lichtkleur en lichtintensiteit gekoppeld, en de proef was in enkelvoud. Daarom is stuurlichteffect (specifieke effect van lichtkleur) niet onomstotelijk te bewijzen. Hiervoor zijn er enkele aanwijzingen.

Bij rode LEDs werd het gewas al snel generatief, vooral in behandeling RD-2, waar de belichting startte om 4:00 uur. In januari waren de planten erg uit balans. Zoals hierboven is beschreven werd de belichting aangepast op 27 januari in vak RD-2 (en daarmee automatisch ook in vak BL-2), en hierna verbeterde de gewasstand snel. Het feit dat rood LED licht voor zonsopgang de plantenbalans verstoortte was mogelijk een stuurlichteffect. Het kan ook verband houden met het feit dat de gewastemperatuur niet gelijktijdig verhoogd werd door straling (zoals bij de zon en bij SON-T).

Of zetting door stuurlicht werd beïnvloed is onduidelijk. In de eerste weken was bij RD de zetting goed en bij BL slecht, maar bij wel een week eerder dan bij ONBL. De zetting kan dus beïnvloed zijn door lichtintensiteit (afnemend van SON-T, RD, BL, ONBL) of door lichtkleur (remming door blauw licht). In maart had BL-1 een slechtere zetting dan BL-2, nadat sinds eind januari had BL-1 meer uren per dag dan BL-2. Dit kan een aanwijzing zijn dat blauw licht de zetting remt (stuurlichteffect).

Bij BL was plantlengte en SLA groter dan bij andere behandelingen. Omdat dit tegenstrijdig is met de algemene literatuur, en omdat lichtkleur en lichtintensiteit gekoppeld waren, is voorzichtigheid geboden met de conclusie te trekken dat dit een gevolg is van stuurlicht. Mogelijk is het een effect van een korte periode van een geringe hoeveelheid extra licht die de bladstrekking stimuleert, waardoor meer licht onderschept wordt. Uiteraard speelt assimilatiebeschikbaarheid ook een rol (minder zetting geeft meer ruimte voor vegetatieve groei).

Volgens de literatuur wordt het zetmeelgehalte beïnvloed door het spectrum, nl. rood/blauw beïnvloedt de suiker/zetmeel balans en BL vermindert zetmeelophoping (zie hieronder 'Zetmeelgehalte').

Temperatuur

De belichtingsbehandelingen lagen in één kas en kregen dus in principe dezelfde teeltomstandigheden. Belichting verandert wel het microklimaat ter plekke. SON-T lampen produceren warmtestraling en LEDs niet. Bovendien werd bij dit LED systeem de warmte van de achterkant afgevoerd m.b.v. waterkoeling. Om dit tekort aan warmtetoevoer van de LEDs (globaal) te compenseren was in de LED velden een extra verwarmingsbuisje aangelegd. Dit lag op de grond, naast de buisverwarming, en 'liep mee' met de hoofdverwarming als de lampen aan waren. De energiewinst van warmteterugwinning uit de LEDs viel (globaal) weg tegen het energieverbruik van het extra buisje.

Uit meting van kasluchttemperatuurgradiënten bleek dat de kasluchttemperatuur meestal iets hoger was bij de LEDs dan bij ONBL en SON-T, op vrijwel alle hoogtes, maar van groter belang is de gewastemperatuur. Deze werd continue gemeten met twee GrowWatches en vertoonde sterk variërende patronen tussen behandelingen. Gemiddelde was het gewas onder SON-T iets warmer (0.4 °C) dan onder LED. Er zijn een aantal redenen waarom de gewastemperatuur onder SON-T maar weinig hoger was dan onder LED. Ten eerste lag bij de LEDs een extra buisje dat compenseerde voor warmteafvoer. Ten tweede was de afstand van de lampen tot het gewas veel groter bij SON-T dan bij de LEDs (bij SON-T aanvankelijk 390 cm en in mei 260 cm, en bij LEDs steeds 150 cm). Ten derde was de stomataire geleidbaarheid hoger bij planten onder SON-T dan bij planten onder LEDs. Dit duidt op hogere verdamping, wat de temperatuur nivelleert.

Overigens is het niet onmogelijk dat het verschil in temperatuur tussen SON-T en LEDs iets groter was voor het groeipunt van de plant (wat weinig verdampt) dan voor grotere bladeren (waaraan de metingen plaatsvonden).

Effect van LEDs op fotosynthese

Zie deel 2 voor de uitwerking van dit onderwerp. In aanvulling daarop kan verwezen worden naar het onderzoekproject aan bladfotosynthese (Snel et al., 2009. Paradiso et al, 2010). Deze onderzoekers hebben aangetoond dat bladfotosynthese aanzienlijk hoger is onder rode LED dan onder SON-T belichting. Beredeneerd wordt dat de winst bij gewasfotosynthese minder zal zijn dan bij bladfotosynthese. Dit heeft te maken met lichtabsorptie in het gewas en mogelijke aanpassing van de gewasstructuur. Aangenomen is dat paprika in dit opzicht vergelijkbaar is met tomaat, en dat het maximaal te verwachten effect is dat LEDs 5 - 10% hogere gewasfotosynthese opleveren dan SON-T. Om dit om te zetten naar hogere productie moeten licht en teeltomstandigheden beter op elkaar afgestemd worden; lichtverliezen geminimaliseerd worden en planten in balans zijn. Door betere sturing van assimilatenverdeling kan het effect van LEDs groter worden dan 5 – 10%.

Zetmeelgehalte

Bepalingen van zetmeelgehalte van het blad in het laboratorium geven lichte aanwijzingen dat het zetmeelgehalte hoger was bij SON-T en RD en lager bij BL in vergelijking met ONBL. In de literatuur is te vinden dat blauw licht de hydrolyse van zetmeel stimuleert en dat rood/blauw verhouding van LED licht een effect heeft op suiker/ zetmeel verhouding in bladeren. Het lijkt de moeite waard om dit onderwerp, met name de rol van lichtkleur in het suiker/ zetmeel metabolisme, nader te onderzoeken.

Evaluatie

In dit project zijn de gestelde vragen beantwoord:

1. Wat is de toegevoegde waarde van rode LEDs?
Het belichtingsrendement van LEDs in deze proef is berekend in Deel 2 van dit rapport. Op basis van bladfotosynthesemetingen wordt 5 – 10% hoger belichtingsrendement voor mogelijk gehouden. Verwacht wordt dat het méér kan zijn als een betere assimilatenverdeling gerealiseerd kan worden.
2. Is belichting met rode LED voor zonsopkomst gunstig voor energiebesparing?
Door belichting met rode LED voor zonsopkomst bleek het gewas uit balans te raken en is daarom vroeg in het onderzoek gestopt. Derhalve kan een uitspraak met betrekking tot energiebesparing niet worden gedaan.
3. Is een minimale hoeveelheid blauw licht nodig voor zetting?
Blauw licht (ca 17 micromol/m²/s) gaf een betere zetting dan onbelicht, maar slechter dan rode LED. Dit kan een gevolg zijn van lichtintensiteit, lichtkleur of beide.

2 Inleiding

De glastuinbouw streeft naar een energietransitie, d.w.z. dat met dezelfde energie-input een flinke meerproductie gerealiseerd wordt, danwel dat met drastisch minder energie dezelfde productie bereikt wordt. LEDs kunnen daarbij een rol spelen door op een energie-efficiënte wijze de productie te verhogen.

In de paprikateelt is behoefte aan belichting om de groei en zetting te stimuleren in de eerste maanden na planten in de donkere winterperiode. Een goede start leidt tot een energie-efficiënte teelt. Belichting met SON-T gaat moeizaam in paprika, waarschijnlijk doordat SON-T teveel warmtestraling (NIR) produceert. Daardoor worden bladeren kleiner en het gewas steeds generatiever. Bovendien moet (vanwege de opwarming tijdens belichting) soms ter compensatie overdag geschermd worden om de gewenste dagtemperatuur te realiseren. Dat gaat ten koste van licht en energie. Belichting met LED zou wellicht een energie-efficiënte oplossing zijn.

De firma Dingemans had in het winterseizoen 2007/2008 al experimenten gedaan met LEDs in paprika. Blauwe LEDs leken mogelijkheden te bieden vooral als stuurlicht t.b.v. de zetting. Verder waren er aanwijzingen dat LED-belichting een gunstiger effect zou hebben dan SON-T belichting vanwege afwezigheid van NIR. LED belichting zou de productie kunnen verhogen en/of gelijkmatiger maken. Tevens waren verwachtingen gewekt door fabrikanten ten aanzien van hoge quantum efficiëntie van de LEDs.

Om een aantal aspecten van LED-belichting bij paprika te onderzoeken, werden in seizoen 2008/2009 een aantal lichtbehandelingen (SON-T, rode en blauwe LEDs) op het bedrijf van Vof Dingemans vergeleken. Doel van dit project was beantwoording van de volgende vragen:

1. Wat is de toegevoegde waarde van LED-belichting in vergelijking met SON-T? Het gaat niet alleen om het momentane effect op de opbrengst, maar ook om de na-effecten op later gevormde vruchten, en de effecten daarvan op de vegetatieve groei.
2. Is belichting met LEDs vóór zonop effectief, en leidt het tot energiebesparing? Door een aantal uren te belichten voor zonop wordt meer fotosynthese gerealiseerd en is het gewas eerder 'opgewarmd' (in staat optimaal te fotosynthetiseren). Ook wordt gebruik gemaakt van goedkopere stroom.
3. Is een minimaal intensiteit blauw licht nodig voor de zetting en productie van paprika? Met alleen een kleine hoeveelheid blauw licht samen met (een lagere intensiteit van) SON-T zou het gewas beter kunnen groeien en ontwikkelen bij een lagere temperatuur. Dit leidt tot minder energieverbruik. Gedacht werd dat een drempelwaarde van circa 20 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ blauw licht een dergelijk stuurlicht effect zou geven.

Deze vragen zijn onderzocht m.b.v. waarnemingen door de teler, metingen en berekeningen door onderzoekers van WUR, en scenario analyses door Plant Dynamics.

De scenario analyses zijn vooral gericht op de vraag: welke intensiteit en duur van bijbelichting is economisch rendabel en welke lichtbron is energetisch het meest effectief om de gevraagde assimilatie te bereiken? Hierbij is belangrijk dat het microklimaat niet zodanig wordt verstoord dat de sink-activiteit van de vruchten terugloopt. Het gaat om de specifieke effecten van LED-belichting op de teelt van paprika in vergelijking met SON-T. Warmte effecten op fotosynthese en verdamping worden daarbij expliciet meegewogen. Het effect van de loskoppeling van NIR en PAR kan met het model effectief worden geëvalueerd.

3 Proefopzet

Bedrijf

Het onderzoek is verricht bij VOF Dingemans in Vierpolders op locatie Oude Dijk 1a, Vierpolders. Ondernemer zijn Wim Dingemans en zoon Stefan Dingemans.

Gewas

Paprika, ras Derby. Zaaidatum 13 oktober, plantdatum 24 november 2008. Plantdichtheid 2,5 plant/m², stengel-dichtheid 7,5 per m².

Belichtingsbehandelingen

In de standaard productiekas waren proefvakken ingericht met SON-T of LED belichting. Tabel 1 geeft een overzicht van de belichtingsbehandelingen.

Tabel 1. Belichtingsbehandelingen in LED praktijkproef paprika 2008/2009. De lichtintensiteit in micromol/m²/s tussen haakjes zoals bedoeld was, en daaronder zoals gemeten (zie hoofdstuk 4). De belichtingstijden zijn zoals bedoeld, maar zijn niet per se zo gerealiseerd. De lichtsommen in mol/m² (een na laatste kolom) zijn berekend door Plant Dynamics. Dit bevat het daglicht (1088 mol/m²) en het kunstlicht.

Nr	Behandeling	Belichting	Micromol /m ² /s	Tijden tot 27 jan	Tijden na 27 jan	Na eind maart	Lichtsom mol/m ²	% kunstlicht
1	ONBL	geen	0	-	-	-	1088	0
2	SON-T	SON-T	(65) 45-52	8:00-16:00	8:00-16:00	8:00-16:00	1266	14
3	LED-RD-1	rode LED (met dag mee)	40 rood) + 2 blauw)	8:00-16:00	8:00-16:00	8:00-16:00	1217	10.6
4	LED-RD-2	rode LED (met dag mee + 4 uur voor zonop)	40 rood) + 2 blauw) 46	4:00-16:00	8:00-12:00	ca 6.30-9 + 's middags	1247	12.8
5	LED-BL-1	blauwe LED (met dag mee)	(20) 17	8:00-16:00	8:00-16:00	8:00-16:00	1146	5.1
6	LED-BL-2	blauwe LED (met dag mee + 4 uur voor zonop)	(20) 17	4:00-16:00	8:00-12:00	ca 6.30-9 + 's middags	1180	7.8

Aanpassing belichtingsperiode

Er zijn twee aanpassingen geweest in de belichtingsperiode van streng 2 van de LEDs, d.w.z. van behandeling RD-2 en BL-2. In januari stond het gewas onder RD-2 erg stil en donker (de teler vond het generatief). Dit werd vermoedelijk veroorzaakt door belichting in vroege ochtend (vanaf 4:00 uur). In overleg met alle betrokkenen is vanaf 27 januari de belichting in de vroege morgenuren gestopt. De lampen werden pas aangeschakeld als het daglicht begon (8:00 uur). Ook werden ze eerder uitgeschakeld: om 12:00 i.p.v. 16:00 uur. Daardoor veranderde

de behandelingen RD-2 en BL-2 nogal drastisch. Eerst hadden ze de langste belichtingsperiode (4:00-16:00) en na 27 januari de kortste belichting (8:00 – 12:00). Na deze aanpassing knapten de planten snel op. Op 13 februari zijn de planten opnieuw beoordeeld, en bleek dat ze verbeterd waren. Eind maart is de belichtingsperiode opnieuw bijgesteld: belichting werd verzet naar 6:30 – 9:00 uur, plus eventueel een paar uur in de middag. Deze veranderingen van belichtingsperiode maken het moeilijker om iets te concluderen over RD-2 en BL-2, aangezien effecten op zetting of bladoppervlak lang doorwerken.

Een verklaring voor de slechte resultaten bij RD-2 is niet gezocht. Het is mogelijk een stuurlichteffect, maar kan ook komen doordat de temperatuur van het gewas niet meegaat met het lichtniveau. Immers, in tegenstelling tot SON-T geven de LEDs geen warmtestraling die het gewas om 4 uur opwarmt. Waarom bij BL-2 geen nadelig effect zichtbaar werd is niet bekend. Dit vraagt om doelgericht onderzoek.

Proefvakken

De ligging van de proefvakken is weergegeven in Figuur 2. De proefvakken zijn 8 m breed en worden gescheiden door een tralie zonder belichting. Herhalingen zijn gescheiden door een vak van 10 m.

ingang	hoofdpad	ONBL	SON-T	LED streng 1	LED streng 2	hoofdpad
		1a	2a	3a	4a	
		1b	2b	3b	4b	
				5 (5a)	6 (5b)	
pad nr		222- 234	250- 262	278- 290	306- 318	

Figuur 2. Positie van proefvakken en richting van de belichtingsstrengen (stippellijnen).

Details proefvakken

SON-T

SON-T belichting lag tussen rij 252 en 262. Het SON-T belichte vak liep vanaf het hoofdpad tot de gevel. Er zaten 3 strengen met elk 14 lampen (42 lampen in totaal). Het oppervlak van het belicht vak was 560 m² (8 x 70 m). Zie gemeten lichtniveaus in hoofdstuk 4.

LEDs

De LED vakken waren kleiner: vanaf de tweede tralie tot de een-na-laatste. Het oppervlak van ieder LED vak was 120 m² (15 x 8 m). Vakken 3a, 3b en 5 lagen tussen rij 278 en 290. Vakken 4a, 4b en 6 lagen tussen rij 306 en 318. Tussen het blauwe en rode vak lag een bufferzone zonder LED units. In het midden van ieder vak lag een telveldje van 1,6 m², met daarin 4 planten (12 stengels).

LED-ROOD:

Rode LED had lichtintensiteit in principe 42 micromol/m²/s, waarvan 40 rood en 2 blauw, ofwel 95.5 % rood en 4.5% blauw. In de vakken met ROOD lagen 7 LED strengen, ieder met 53 LED units (Lemnis Oreon Combi 57/3). De afstand tussen de strengen was 1.14 m, en de afstand tussen de units 1.82 m. Het aantal units per streng was 7 of 8. De dichtheid was 53 units op 120 m², ofwel 0.44 LED/m². Per vak lagen er 3 Oreon PSU 1500W. Geschat vermogen van de Lemnis Oreon Combi 57/3 (inclusief leiding verliezen) is 32 W/m², ofwel ca 3,9 kW per vak. Oreon PSU 1500W: 2.6 W/m², ofwel 0.3 kW per vak. Totaal vermogen is ca 35 W/m² en 4.2 kW per vak.

LED-BLAUW:

De lichtintensiteit was 20 micromol/m²/s. In de vakken met BLAUW lagen 7 LED strengen, ieder met 32 LED units (Lemnis Oreon blue 39). De afstand tussen de strengen was 1.14 m, en de afstand tussen de units 3.18 m. Het aantal units per streng was 4 of 5. De dichtheid was 32 LED lampen op 120 m², ofwel 0.27 LED/m². Per vak liggen er 2 Oreon PSU 1500W. Geschat vermogen van een vak met Lemnis Oreon blue 39 (inclusief leiding verliezen): is 19 W/m², ofwel 2.3 kW per vak. De Oreon PSU 1500W verbruikt 1.6 W/m², ofwel 0.2 kW per vak. Het totaal vermogen is ca 21 W/m² en 2.5 kW per vak.

Zie lichtmetingen in hoofdstuk 4.

Teeltomstandigheden

Voor gegevens over temperatuur, luchtvochtigheid, CO₂, en lichtsommen:

zie Deel 2 (rapport van Plant Dynamics), paragraaf 2.5 Microklimaat.

4 Lichtmetingen

Samenvatting

Er zijn uitvoerige lichtmetingen gedaan door WUR medewerkers aan lichtniveaus en ook aan horizontale en verticale gradiënten. De belichte proefvelden waren 120 m² groot, en er waren randeffecten. Maar de lichtverdeling in de waarnemingsveldjes was voldoende, en er was geen probleem dat SON-T licht doorstraalde naar de LED velden.

De lichtniveaus moeten bekeken worden op gewashoogte (dus bij de kop). Dan blijkt dat SON-T in januari op 45 micromol/m²/s zat, in april op ca 52 (verschil komt doordat de plantkoppen dichterbij de lampen kwamen). Daarentegen werden de LED strengen af en toe verhangen, waardoor de afstand tussen LEDs en plantkoppen min of meer constant was. De rode LEDs zaten steeds ca 150 cm boven het gewas, en het lichtniveau was daar ca 46 micromol/m²/s. Er was in feite maar een gering verschil in lichtniveau tussen SON-T en rode LEDs. Blauwe LEDs zaten iets dichterbij het gewas (omdat de planten hoger waren) en het lichtniveau ter hoogte van de plantkoppen was ca 16-18 micromol/m²/s.

Lichtmetingen

De lichtverdeling in horizontale en verticale richting is gemeten met een Licor PAR meter in micromol/m²/s, op 29 december 2008, toen het gewas nog laag was (ca 1 m boven de grond). In de LED behandeling werd in principe altijd een afstand van 150 cm aangehouden tussen de kop van de planten en de LEDs. Bij SON-T werd de afstand tussen koppen van het gewas en de lampen langzamerhand kleiner, van 390 cm in december tot 267 cm eind april (zie Tabel 2).

Tabel 2. Afstand tussen planten, draad, lampen, enz. in het SON-T vak op drie meetdagen

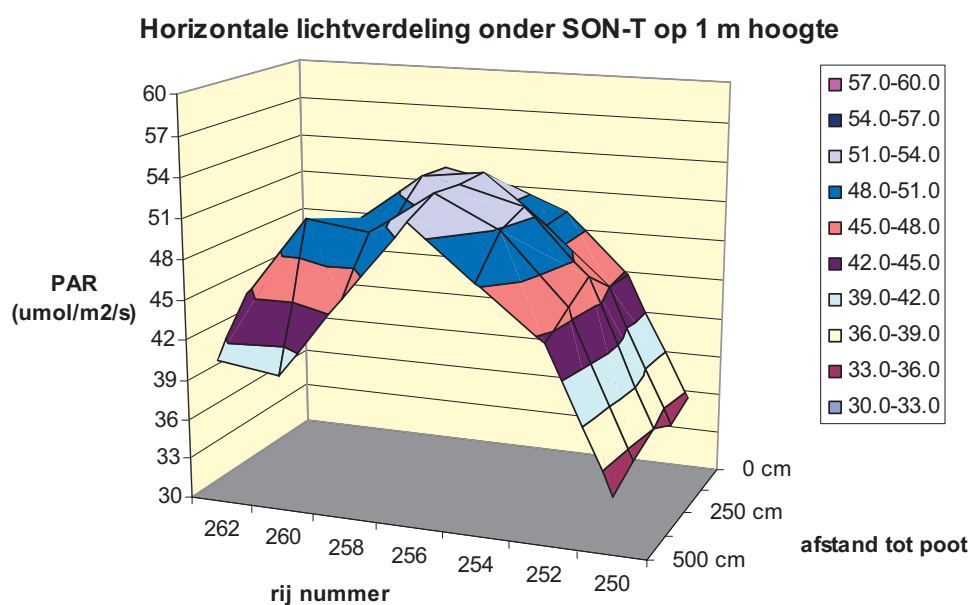
Afstand tussen punten	29 dec 08	20 mar 09	30 apr 09
lamp ⇕	80 cm	80 cm	80 cm
draad ⇕	310 cm	227 cm	187 cm
kop gewas ⇕	67 cm	150 cm	190 cm
steenwol blokje ⇕	30 cm	30 cm	30 cm
grond			
afstand van kop gewas tot lampen	390 cm	307 cm	267 cm
afstand van grond tot draad	407 cm	407 cm	407 cm
afstand van kop gewas tot draad	310 cm	227 cm	187 cm

Horizontale lichtverdeling onder SON-T

De horizontale lichtverdeling van de SON-T lampen is gemeten op ca 1 m hoogte, net boven de planten (die toen 97 cm waren vanaf de grond). Gemeten werd midden in de paden vanaf de paal van tralie 3 en 5 m naar achteren in stappen van 125 cm. Resultaten in Tabel 3 en Figuur 3-5. Het lichtniveau was het hoogst in het midden van het vak, en nam sterk af in de buitenste paden van het vak. In de richting van poot naar poot over een afstand van 5 m is de lichtverdeling goed homogeen.

Tabel 3. Horizontale verdeling van lichtintensiteit (in micromol/m²/s) onder SON-T belichting op 1 m hoogte (net boven het gewas) in paden 262 – 250 op 29 december 2008. Zie ook de figuur hieronder.

Afstand tot poot	262	260	258	256	254	252	250	gem.
500 cm	40.8	40.1	46.3	52.1	48.2	44.6	34.3	43.8
375 cm	44.5	50.6	50.0	53.2	50.9	45.8	35.2	47.2
250 cm	43.0	47.1	50.1	52.9	51.7	46.9	36.0	46.8
125 cm	43.9	48.8	52.3	53.0	49.3	45.0	34.8	46.7
0 cm	43.2	48.8	52.2	51.2	49.4	44.8	35.5	46.4



Figuur 3. Horizontale verdeling van lichtintensiteit (in micromol/m²/s) onder SON-T op 29 december 2008 op 1 m hoogte (net boven het gewas). Zie ook bovenstaande tabel.

Verticale lichtverdeling onder SON-T

De verticale lichtverdeling is gemeten boven vier gewasrijen: pad 258 (centraal in het proefvak) en pad 262 (aan de rand van het proefvak). In beide paden is links en rechts gemeten, op 13 hoogtes, variërend van 0 tot 300 cm onder de draad. Alle meetplaatsen lagen boven het gewas. De lichtintensiteit varieerde zeer sterk op hoogte 0 cm, de hoogte van de gewasdraad. Dit wordt verklaard door 'lichtkegels': tussen lichtkegels is bijna geen licht, en waar lichtkegels elkaar overlappen is de lichtverdeling meer homogeen.

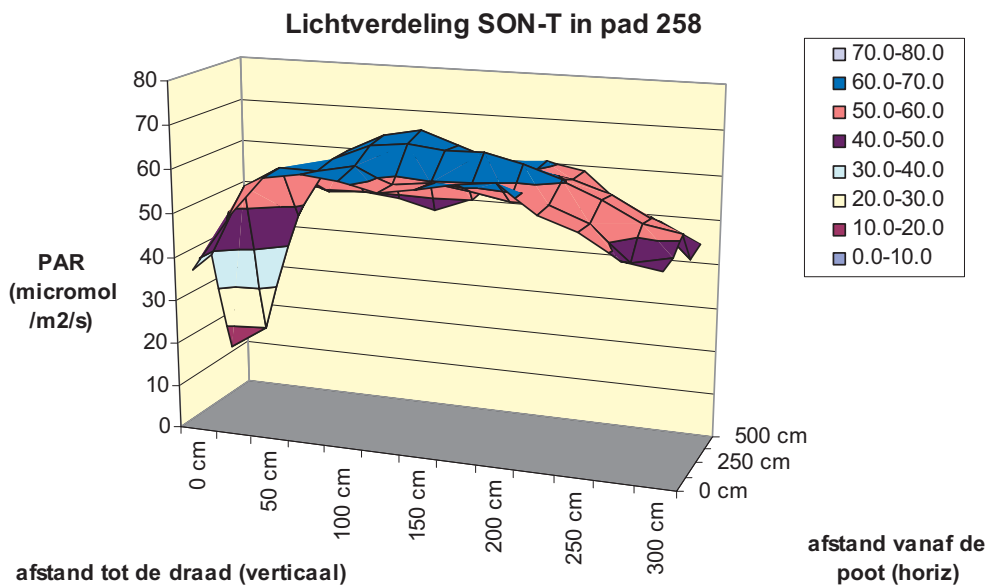
Ter hoogte van de draad was het gemiddelde van 20 lichtmetingen 104,5 micromol/m²/s, met 80% standaard afwijking. Meer naar beneden, werd de standaard afwijking gering, wat duidt op een homogene lichtverdeling. Het lichtniveau was 53,8 micromol/m²/s op 200 cm onder de draad, en 45,3 op 300 cm onder de draad. Volgens het onderzoekplan moest het lichtniveau 65 micromol/m²/s zijn. Dit werd gemeten op 75 - 100 cm onder de draad.

Doordat het gewas groeide veranderde langzamerhand de afstand van de kop van de plant tot de lamp (zie Tabel 2). Tot eind maart was die afstand meer dan 3 m. In Tabel 4 is de lichtintensiteit weergegeven op verschillende hoogtes, uitgedrukt in afstand tot de draad en tot de lampen. De lichtintensiteit ter hoogte van de kop van het gewas varieerde van 45 micromol/m²/s in december tot ca 56 micromol/m²/s in mei. Dit niveau is in dezelfde orde van grootte als die onder de LED belichting ter hoogte van de koppen van het gewas, nl 43 - 47 micromol/m²/s (zie verder, Tabel 5 - 6).

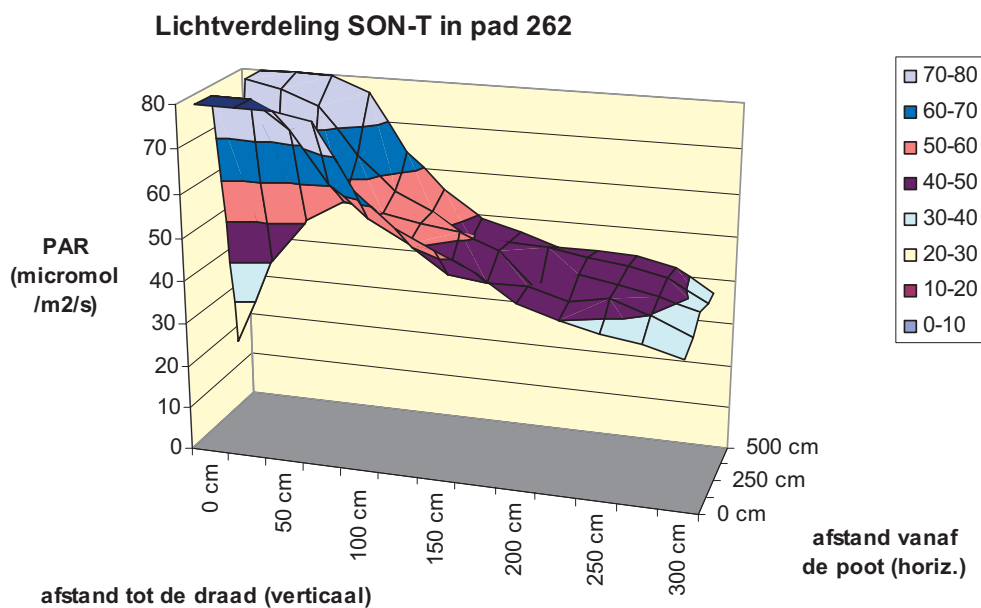
Tabel 4. Verticale verdeling van lichtintensiteit (in micromol/m²/s) onder SON-T lampen; gemiddelde en standaard afwijking van 20 metingen per hoogte, op 13 hoogtes (allemaal boven het gewas). Schuingedrukte cijfers in grijs gebied is waar de kop van het gewas zat.

Afstand tot de draad (cm)	Afstand tot de lampen (cm)	Gemiddeld lichtintensiteit (micromol/m ² /s)	Standaard afwijking (%)
0 cm	80	104.5	80.2
25 cm	105	83.1	48.2
50 cm	130	75.3	26.1
75 cm	155	67.5	12.3
100 cm	180	63.2	8.3
125 cm	205	58.9	8.7
150 cm	230	56.9	10.6
175 cm	<i>255 (kop in mei)</i>	<i>55.6</i>	11.2
200 cm	<i>280</i>	<i>53.8</i>	13.5
225 cm	<i>305</i>	<i>52.2</i>	12.5
250 cm	<i>330</i>	<i>49.9</i>	10.6
275 cm	<i>355</i>	<i>47.6</i>	11.5
300 cm	<i>380 (kop in jan.)</i>	<i>45.3</i>	13.9

Lichtverdeling onder SON-T



Figuur 4. Lichtverdeling(in micromol/m²/s) onder SON-T belichting links van pad 258. Dit is in het midden van het SON-T veld.



Figuur 5. Lichtverdeling(in micromol/m²/s) onder SON-T belichting links van pad 262. Dit is aan de rand van het SON-T veld.

Figuren 4 en 5 laten de lichtverdeling zien boven twee gewasrijen. De afstand tussen de kop van het gewas en de draad was 300 cm (in januari) en 175 cm (in mei) onder. Het lichtniveau op die hoogtes was vooral 40-50 en 50-60 micromol/m²/s. Dit komt overeen met de Tabel op de vorige pagina.

Lichtverdeling onder rode LEDs

In de rode LED belichting zijn lichtmetingen gedaan op 29 december 2008 in rij 284, in het midden van het rode LED vak. De verticale verdeling werd vastgesteld door metingen op 9 hoogtes in het gewas. Doordat op twee plaatsen werd gemeten, ontstond ook een beeld van de horizontale verdeling. Bovenin, 25 cm onder de rode LEDs varieerde de lichtintensiteit tussen 7 en 656 micromol/m²/s. Net als bij SON-T lampen, is het licht alleen goed verdeeld wat verder naar beneden, waar de lichtkegels van de lampen elkaar overlappen.

Op 100 cm afstand van de LEDs en lager, was de lichtverdeling behoorlijk gelijkmatig. Op 150 cm onder de LEDs werd gemiddeld 46,5 micromol/m²/s gemeten (in deze metingen, zie Tabel 5). Dit is ter hoogte van de kop van het gewas, want de LED lampen werden af en toe verhangen, zodat de afstand tussen rode LED lampen en planten ca 150 cm was.

Tabel 5. *Verticale verdeling van lichtintensiteit (in micromol/m²/s) onder de rode LEDs op 29 december 2008 op 9 hoogtes (allemaal boven het gewas) en op twee plaatsen. De koppen van het gewas zaten meestal ca 150 cm onder de LEDs (cursief in grijs gebied).*

Afstand tot de LEDs	Recht onder LEDs	Midden tussen LEDs	Gemiddeld
25 cm	656	7	331.5
50 cm	161	31	96.0
75 cm	81	43	62.0
100 cm	57	47	52.0
125 cm	52	47	49.5
<i>150 cm</i>	<i>46</i>	<i>47</i>	<i>46.5</i>
175 cm	45	44	44.5
200 cm	39	38	38.5
225 cm	30	32	31.0

Horizontale lichtverdeling onder rode LEDs

Van belang is de horizontale lichtverdeling op hoogte 150 cm onder de LEDs, de hoogte waar in principe de kop van het gewas zit. Lichtmetingen op deze hoogte zijn gedaan in pad 284, in het midden van het belichte vak. Gemeten is onder en tussen de strengen en verder ook onder en tussen de lampen. Het licht bleek goed egaal verdeeld te zijn: lichtniveau ca 43 micromol/m²/s (zie Tabel 6). Dit komt goed overeen met het lichtniveau volgens het proefplan was 42 micromol/m²/s.

Tabel 6. *Horizontale verdeling van lichtintensiteit (in micromol/m²/s) onder rode LED lampen in rij 284 op 29 december 2008 op hoogte 150 cm onder de LEDs (de plaats van de kop van het gewas).*

	Tussen	Onder	Tussen	Onder	Tussen	Gem.
Onder de LED streng	42.4	43.5	43.5	43.3	43.8	43.3
Tussen LEDs strengen	41.0	43.7	43	43.6	41.8	42.6

Lichtverdeling onder blauwe LEDs

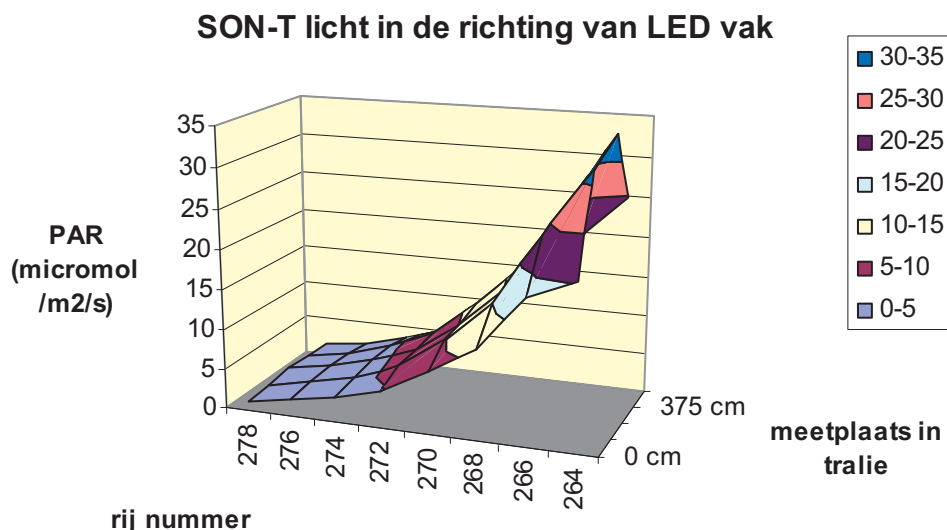
Ook onder de blauwe LEDs was het licht tamelijk egaal verdeeld op hoogte ca 150 cm onder de LEDs (zie Tabel 7). Bij de blauwe LEDs was de afstand tussen de koppen van de planten en de LEDs minder dan bij de rode LEDs, omdat de planten onder blauwe LEDs langer werden (het verschil was ca 10 cm in februari en ca 25 cm in mei). De afstand tussen gewas en blauwe LED lampen was ca 140 tot 125 cm. Het gemiddelde lichtniveau op hoogte 150 cm was 15 - 16 micromol/m²/s. Geschat wordt dat het bij de koppen van het gewas ca 16-17 micromol/m²/s was en later 17-18 micromol/m²/s. Volgens het proefplan moest de lichtintensiteit 20 micromol/m²/s zijn.

Tabel 7. Horizontale verdeling van lichtintensiteit (micromol/m²/s) onder blauwe LED lampen op 29 december 2008, op ca 150 cm onder de LEDs in rij 284. De afstand die steeds werd aangehouden tussen de lampen en de kop van het gewas was in principe 150 cm onder de rode LEDs, en daardoor ca 130 cm in de blauwe LEDs.

	Onder	Tussen	Onder	Tussen	Onder	Tussen	Onder	Gem.
Onder LEDs	17.4	15.1	17.6	14.6	17.7	14.4	15.9	16.1
Tussen LEDs	14.9	15.9	16.2	15.9	15.5	14.7	13.2	15.2

Verstoring door SON-T licht van LED vak?

De vraag was in hoeverre het felle licht van de SON-T lampen doorstraalt naar het LED-vak (string 1). Lichtmetingen zijn gedaan met alleen de SON-T lampen aan en de LEDs uit, in de paden 264 – 278. Deze paden liggen tussen de SON-T en eerste LED vak (RD-1). De eerste LED streng hangt naast pad 278. Figuur 6 toont de resultaten. In pad 278 is de lichtintensiteit van SON-T licht teruggevallen tot minimaal. De LED velden worden dus niet verstoord door SON-T belichting.



Figuur 6. Uitstraling van licht van SON-T vak in de richting van LED-vak.

5 Vegetatieve groei

Plantwaarnemingen

Overzicht

Plantwaarnemingen zijn gedaan op 16 december, 27 januari, 13 februari, 12/20/31 maart, 14 april en 15 mei. Voor zetmeelbepalingen werden monsters genomen op 27 januari en 13 februari. Op 31 maart zijn bladeren geoogst om bladcoupes te maken i.v.m. zetmeelgehalte. De data worden hieronder gepresenteerd om effecten van belichting te bepalen. Verder zijn de data aangeleverd aan Plant Dynamics voor gebruik in het simulatiemodel. Details over de gevolgde methoden van plantwaarnemingen zijn te vinden in Bijlage 1.

Samengevat waren de resultaten dat de vegetatieve groei beter verliep bij BL en ONBL, dan onder SON-T en RD. De planten in BL-1 waren het langst, grootst, met meeste bladoppervlak.

Plantmetingen op 27 januari 2009

Vanaf half januari was de gewasstand niet goed onder de rode LED belichting. Op 27 januari zijn plantwaarnemingen gedaan, foto's gemaakt, een visuele beoordeling geschreven en bladeren bemonsterd voor zetmeelbepaling.

Visuele beoordeling

Planten in ONBL stonden er goed bij en waren 'blond' in de morgen. In RD-2 was het bovenste blad donkergroen en de kop 'plat'. In RD-1 was de kop ook platter en donkerder dan in de ONBELICHTE planten, maar mindere dan bij RD-2. Een platte kop houdt in dat de bovenste internodiën niet erg gestrekt zijn. Daardoor zitten er grote bladeren bovenin en kan het bovenste bloemetje soms zowat boven de kop uitsteken. Dit is ongewenst. Zie foto's in Bijlage IV.

Aanpassing belichting

Op basis hiervan werd besloten dat de plant balans verstoord was in RD-2 en dat de belichting hier zou worden aangepast. Waarschijnlijk werden de verschijnselen veroorzaakt doordat de belichting startte voor zonsopkomst (4:00 uur). Daarom werd de starttijd verschoven naar 8:00 uur. De eindtijd was 16:00 en werd veranderd naar 12:00 om het gewas een tijdje rust te geven. De oude belichtingsperiode (4:00-16:00) was de langste, terwijl de nieuwe belichtingsperiode (8:00-12:00) de kortste periode was. De belichtingstijd van BL-2 was direct gekoppeld aan die van RD-2 en veranderde dus mee.

Resultaten plantmetingen op 27 januari (details in Bijlage I)

ONBELICHT: redelijk hoog bladgewicht, grootste bladoppervlak, meest gestrekte blad (hoogste SLA), laag aantal bladeren. Sterke kop, goede 'blonde kleur' (licht in de morgen).

SON-T: laagste bladgewicht van blad, kleinste bladoppervlak, redelijke dun blad (redelijk hoge SLA), medium aantal bladeren.

RD-1: hoog bladgewicht, medium bladoppervlak, medium bladdikte (SLA), meeste bladeren. Kop behoorlijk plat en donker.

RD-2: medium tot hoog bladgewicht, medium bladoppervlak, dikste blad (laagste SLA). Kop duidelijk 'plat', en bovenste blad donkergroen (niet 'blond').

BL1&2: redelijk hoog bladgewicht, groot bladoppervlak, medium bladdikte (SLA). Blad goed, maar zetting niet zo goed, balans niet optimaal.

Plantmetingen op 13 februari 2009

Op 13 februari zijn opnieuw gewasmetingen gedaan om te beoordelen of aanpassing van belichting op 27 januari effect had gehad. Vruchten waren bijna oogstbaar. Er zou groen geoogst gaan worden om planten te ontlasten. Zie foto's van de koppen van de planten in Bijlage IV.

Visuele beoordeling

De planten in RD-2 leken grotendeels te herstellen. De kop was niet meer zo duidelijk 'plat' als eind januari. Blad bovenin de planten was lichter groen van kleur geworden, maar blad onderin de planten was nog wel donkerder groen dan bij andere behandelingen.

Resultaten plantmetingen op 13 februari (details in Bijlage I)

De meeste behandelingenverschillen waren niet significant, vanwege relatief hoge standaard afwijking. Alleen BL-1 sprong er iets uit met iets hoger bladgewicht en bladoppervlak. De volgende trends zijn waarneembaar.

ONBELICHT: medium tot hoog bladgewicht, medium bladoppervlak, medium bladdikte (SLA), laag aantal bladeren. Sterke kop, goede 'blonde kleur' (licht in de morgen).

SON-T: laag bladgewicht, klein bladoppervlak, dik blad (lage SLA), medium aantal bladeren. Gewas staat er niet lekker bij.

RD-1: laag bladgewicht, laag bladoppervlak, medium bladdikte (SLA), laag-medium aantal bladeren.. Matige visuele beoordeling.

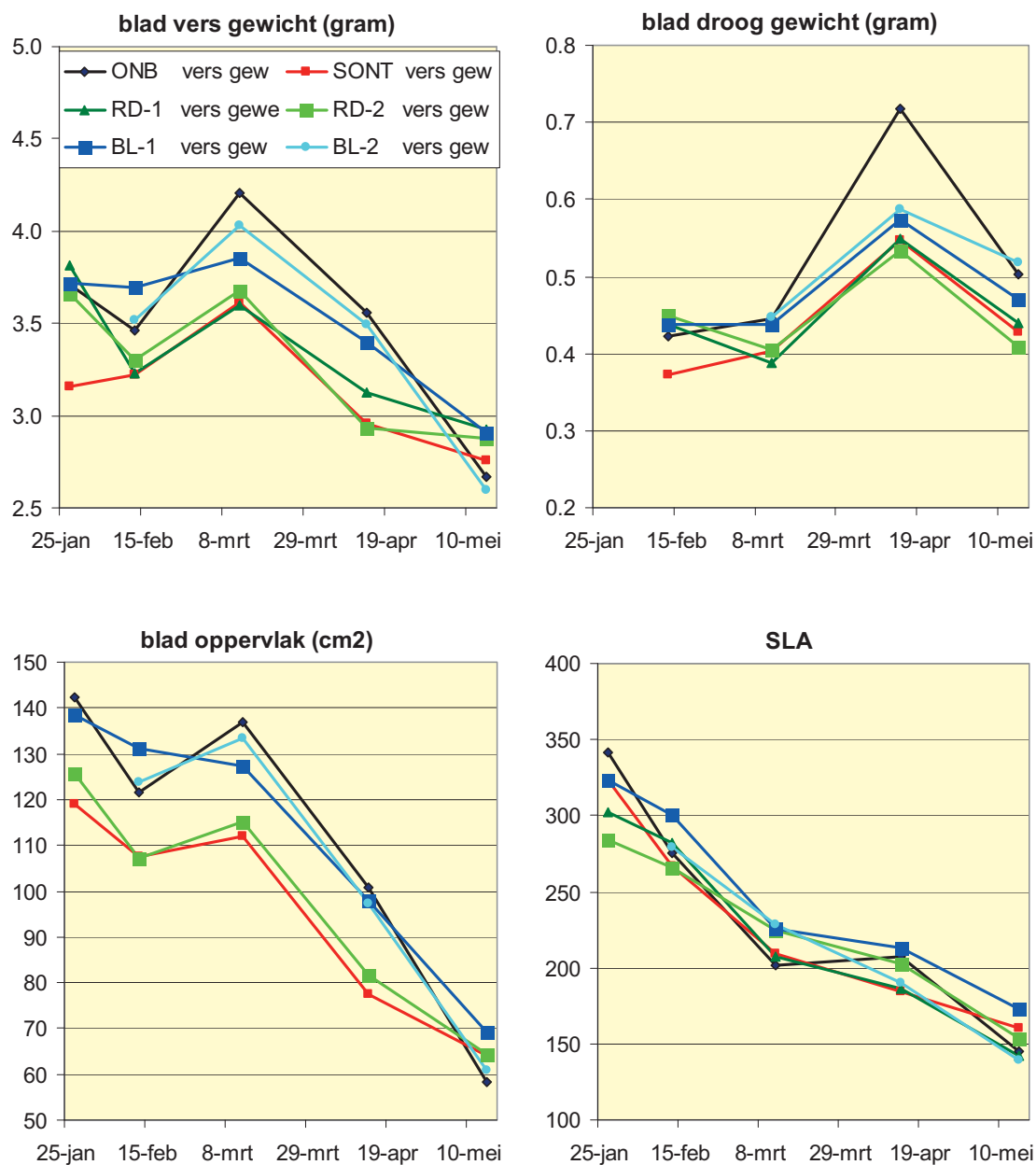
RD-2: vrij laag bladgewicht, laag bladoppervlak, dikste blad (laagste SLA), hoogste aantal bladeren. Koppen zijn redelijk hersteld.

BL-1: hoog bladgewicht, grootste bladoppervlak, dunste blad (hoogste SLA), vrij hoog aantal bladeren. Visuele beoordeling: goed.

BL-2: medium tot hoog bladgewicht, medium groot bladoppervlak, medium bladdikte (SLA), vrij laag aantal bladeren. Visuele beoordeling: redelijk.

Resultaten in figuren op volgende pagina's. Details over methode en resultaten van gewaswaarnemingen in Bijlage I.

Bladparameters



Figuur 7 a,b,c,d.

Plantwaarnemingen, gemiddelde van 10 jonge vrijwel volgroeide bladeren. a) Blad versgewicht (gram), b) blad droog gewicht, c) gemiddeld bladoppervlak van een blad en d) Specific Leaf Area (gestrektheid van blad, in cm^2/gram).

De bladeren waren het zwaarst in ONBL, gevolgd door BL-2 en BL-1. In SONT waren de bladeren vaak het lichtst in gewicht. Bij bladoppervlak is de volgorde ongeveer hetzelfde. SLA is het hoogst bij BL-1 (d.w.z. bladeren zijn het meest gestrekt), en relatief laag bij SON-T. Deze trends komen ongeveer overeen met de hoeveelheid licht, namelijk dat onder invloed van lage lichtintensiteit planten meer kunnen investeren in bladeren (doordat er minder zetting is), en dat bladeren meer strekken ('schaduwbladereneffect'). Zie verder bespreking in de Einddiscussie

LAI

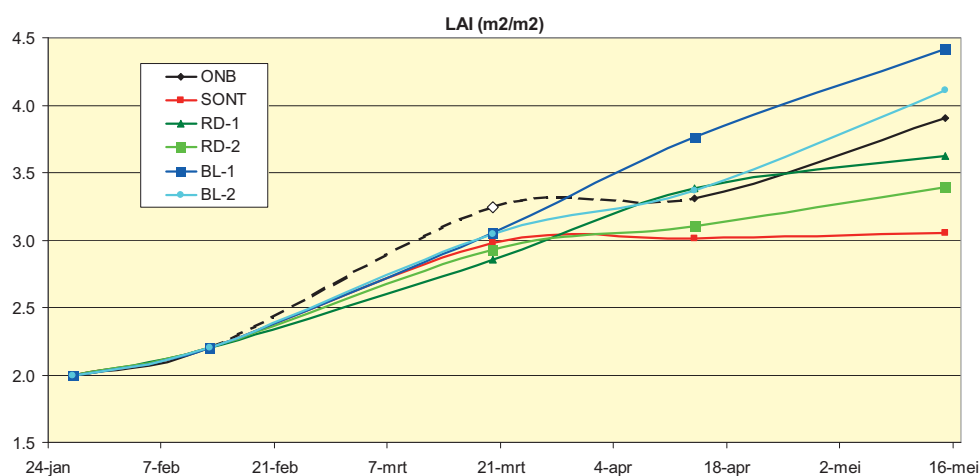
De LAI is vijf keer bepaald in deze proef. Dit moest non-destructief gebeuren. Zie gevolgde methode in Bijlage II, en zie resultaten in Tabel 8 en Figuur 8. hoge LAI in ONBL op 20 maart is waarschijnlijk een schattingsfout (vanwege de non-destructieve manier van bepalen). Dit punt is daarom gestippeld in Figuur 8.

Op 27 januari en 13 februari was de LAI niet duidelijk verschillend tussen behandelingen. Daarom is voor alle behandelingen dezelfde LAI waarde aangenomen (respectievelijk 2.0 en 2.2). Op 20 maart waren de verschillen nog steeds klein. LAI was het hoogst in ONBL, en het laagst in RD-1 en RD-2. Op 14 april en 15 mei hadden BL-1 en BL-2 de hoogste LAI, en SON-T de laagste. RD-1 en RD-2 zaten beide onder het gemiddelde.

Waarschijnlijk heeft het verloop van de LAI te maken met de plantbalans, of meer precies, met de afwisseling van vegetatieve en generatieve groei. BL-1 en BL-2 hadden aanvankelijk slechte zetting (zie Figuur 18). Daardoor waren meer assimilaten beschikbaar voor vegetatieve groei, o.a. bladgroei. Bovendien hadden ze een lager lichtsom (vooral BL-2 vanwege korte belichtingsduur). Dit stimuleert bladstrekking. Dit leidde tot groter blad (grotere LAI) in april. Dit geeft hogere lichtonderschepping en dus hogere assimilatenaanmaak. Assimilatenaanbod versterkt de zetting.

Tabel 8. *Overzicht van LAI. aantal bl/m² = aantal bladeren per m². opp 1 blad = oppervlak van één blad (cm²)*

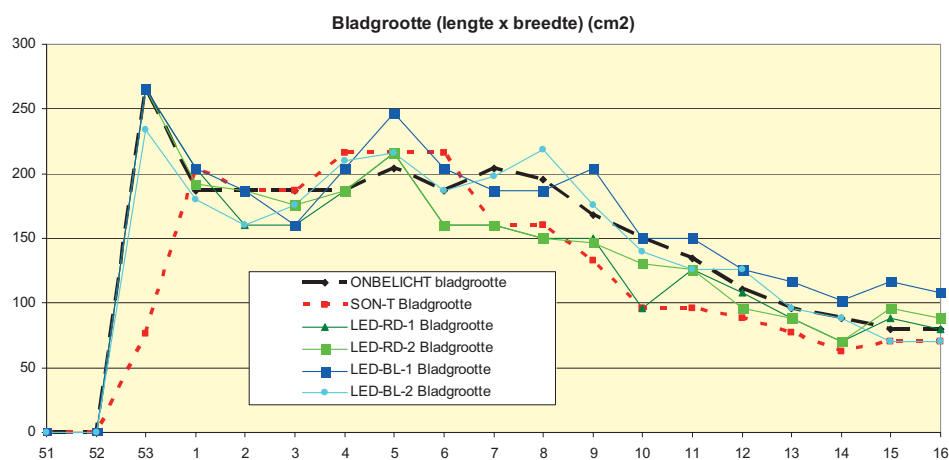
	27 jan	13 feb	20 maart		14 april			15 mei			
	LAI	LAI	Aantal bl/m ²	Opp 1 blad	LAI	Aantal bl/m ²	Opp 1 blad	LAI	Aantal bl/m ²	Opp 1 blad	LAI
ONB	2.0	2.2	208	164	(3.2)	234	149	3.3	299	138	3.9
SON-T	2.0	2.2	199	157	3.0	215	148	3.0	303	106	3.1
RD-1	2.0	2.2	193	156	2.9	241	148	3.4	330	116	3.6
RD-2	2.0	2.2	209	148	2.9	241	136	3.1	324	110	3.4
BL-1	2.0	2.2	209	154	3.1	242	164	3.8	330	141	4.4
BL-2	2.0	2.2	197	163	3.0	233	152	3.4	296	146	4.1
Gem.	2.0	2.2	202	157	3.0	234	150	3.3	314	126	3.8



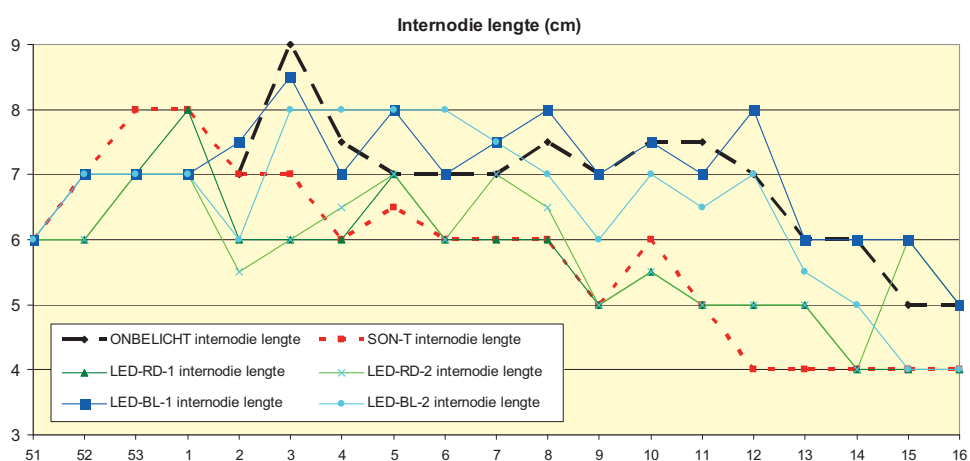
Figuur 8. *LAI verloop in de zes behandelingen.*

Bladgrootte & internodiënlengthe

In de gewasregistratie door de teler werden ook bladgrootte en internodiënlengthe geregistreerd.



Figuur 9. Grootte van een jong volgroeid blad (lengte x breedte in cm^2).



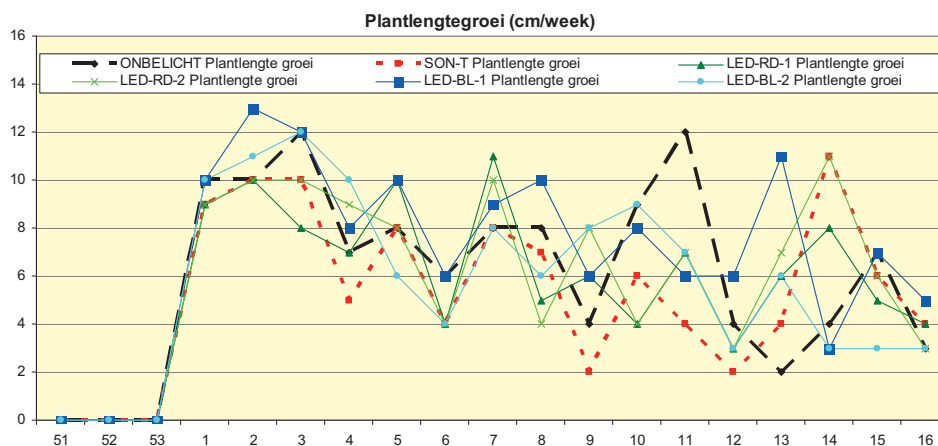
Figuur 10. Internodiënlengthe (cm).

De bladeren waren het grootst in BL-1, gevolgd door BL-2 en ONBL. Bladeren waren het kleinst in SON-T gevolgd door RD-1 & 2. In alle behandelingen neemt de bladgrootte af in de tijd. Internodiënlengthe toont precies dezelfde trends.

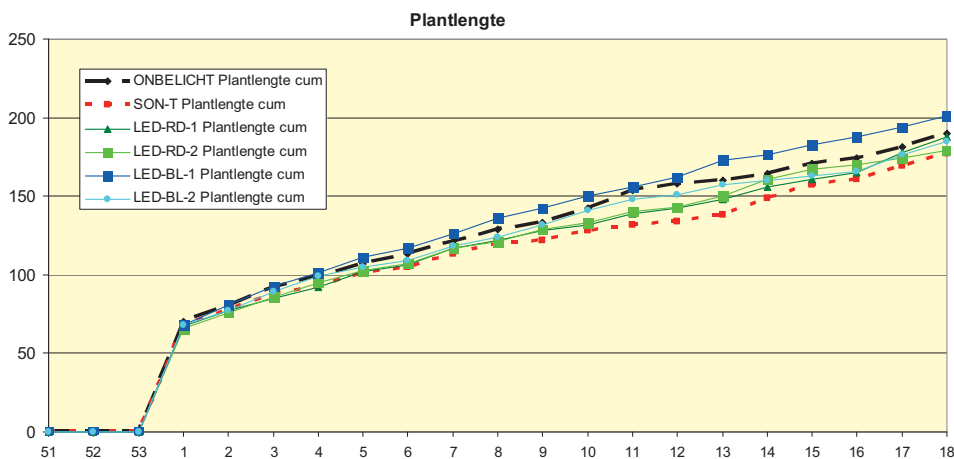
De verklaring ligt waarschijnlijk in gemiddeld lichtniveau: bij minder licht gaan bladeren en internodiën meer strekken. Ook assimilatenverdeling zal een rol spelen (minder zetting geeft meer ruimte voor vegetatieve groei).

Plantlengte

Plantlengte gegevens komen uit de gewasregistratie door de teler.



Figuur 11. Plantlengtegroei (toename in cm/week).



Figuur 12. Plantlengte (cm).

De planten groeiden het meest en waren het langst in BL-1, gevolgd door ONBL en BL-2. Planten groeiden het langzaamst en waren het kleinst in SON-T gevolgd door RD-1 & 2. Deze trends zijn ongeveer dezelfde als bij bladgrootte & internodiënlengte.

De verklaring kan gezocht worden in gemiddeld lichtniveau (bij minder licht meer strekking) en ook assimilatenverdeling (minder zetting geeft meer ruimte voor vegetatieve groei). Verdere bespreking volgt aan einde van hoofdstuk Productie.

Bespreking van waargenomen effecten

In deze proef zijn een aantal opvallende waarnemingen gedaan.

SLA en plantlengte waren het hoogst bij BL-1 (hoge SLA houdt in dat de bladeren meer gestrekt) zijn, en relatief laag waren bij SON-T.

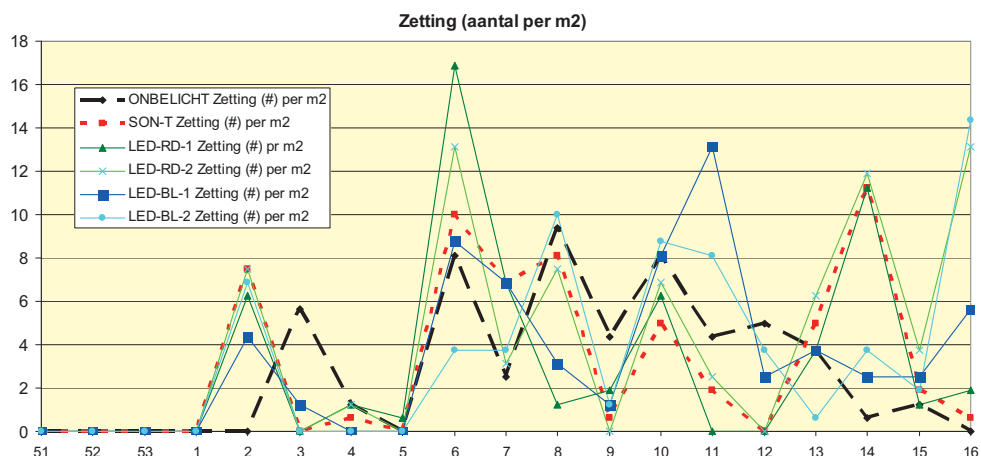
Mogelijk is dit te wijten aan de lichtkleur (stuurlicht), maar het is ook mogelijk een gevolg van verschillen in lichtintensiteit, omdat lichtkleur en lichtintensiteit in de verschillende behandelingen waren gekoppeld. In het algemeen staat blauw licht bekend om het effect van aanmaken van zonnebladeren (kleiner oppervlak, maar dikker blad, dus lager SLA). In deze proef echter, werd juist het tegenovergestelde waargenomen.

Er is een aantal zaken die in beschouwing genomen moeten worden. Een is dat BL een lagere lichtintensiteit had dan RD en SON-T, maar wel hoger dan ONBL. Bij BL-2 was de belichtingsduur kort, dus de lichtsom extra kort. Een ander aspect is dat bij paprika de vruchtgroei en vegetatieve groei elkaar sterk afwisselen.

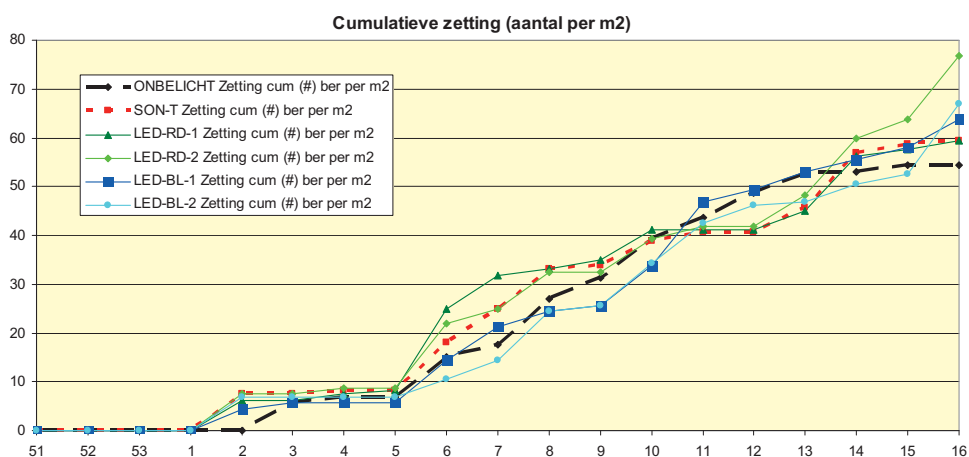
6 Productie

Zetting

Zetting en productie zijn geregistreerd in de gewasregistratie door de teler.



Figuur 13. Zetting in de telveldjes (aantal per m² per week)



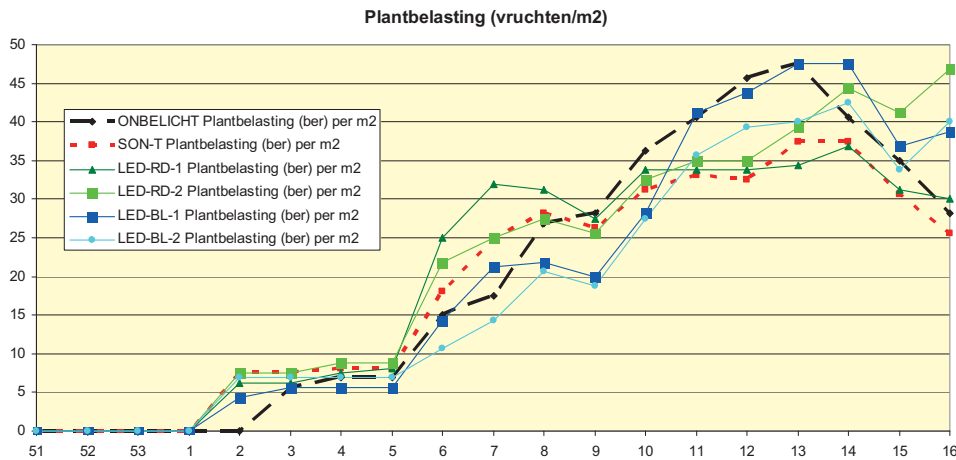
Figuur 14. Cumulatieve zetting in de telveldjes (aantal per m²)

- Vroege zetting was het beste in SON-T en RD-1 & RD-2 (met pieken in week 2 en 6).
- BL-1 gaf matige eerste zetting, maar in week 11 was er een piek in de zetting
- BL-2 zette goed in week 2, maar daarna erg matig
- ONBL zette eerste zetsel een week later en bleef matig. Uiteindelijk laagst.
- Cumulatieve zetting tot week 8 was het hoogst in RD-1, RD-2 en SON-T.
- Opvallend is dat BL-1 en BL-2 lange tijd lagere zetting hadden dan ONBL (zie einddiscussie)
- In week 11-14 lag BL-1 even aan kop
- Vanaf week 14 had RD-2 duidelijk de hoogste cumulatieve zetting
- Het is moeilijk om de effecten van lichtkleur en lichtintensiteit te onderscheiden, want die waren gekoppeld.

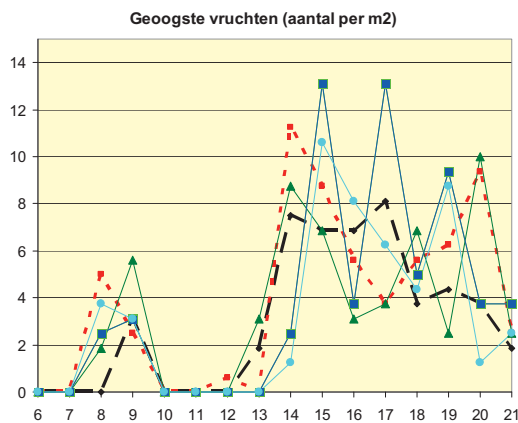
Voor verdere discussie van de resultaten zie Eindbespreking in laatste paragraaf in dit hoofdstuk.

Plantbelasting

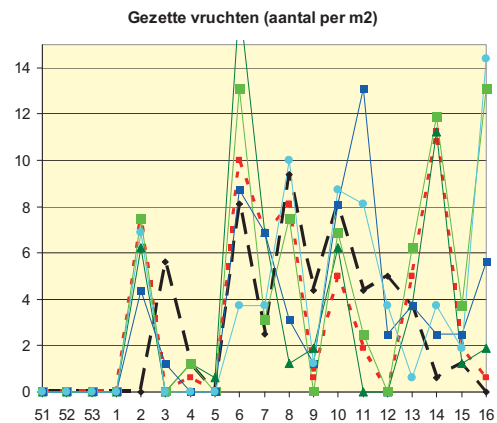
Plantbelasting is het aantal vruchten aan de plant, berekend uit gezette minus geoogste vruchten. Het is uitgedrukt in aantal per m^2 .



Figuur 15. Plantbelasting (gezette minus geoogste vruchten) in aantal/ m^2 .



Figuur 16. zetting (aantal/ m^2 /week).



Figuur 17. Oogst (aantal/ m^2 /week).

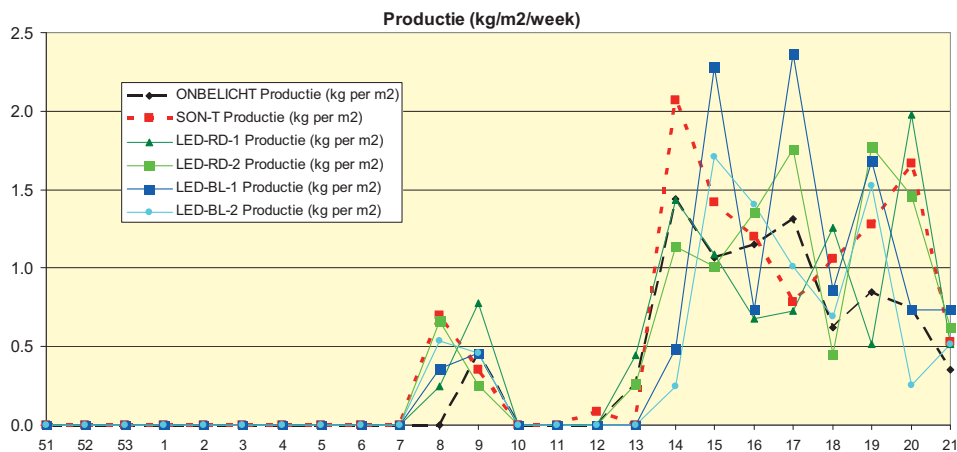
In week 2-3 en 6-7 was er veel zetting, dus stijgende plantbelasting. In week 8-9 was de eerste oogst, waardoor de plantbelasting daalde. Goede zetting in week 10-11 en week 14 hield de plantbelasting op peil. In week 14-15 werd meer geoogst dan gezet, wat de plantbelasting verminderde.

Van week 1 tot 8 hadden SON-T en RD-1 & 2 een redelijke tot grote voorsprong in plantbelasting. In week 8/9 werd in deze behandelingen veel geoogst en wat minder gezet, behalve in ONBL. Hierdoor werd de plantbelasting in ONBL in week 10 relatief hoog. In week 11 was er een enorme zettingspiek in BL-1, wat leidde tot hoge plantbelasting. In week 15-16 werd overal veel geoogst, en daalde de plantbelasting.

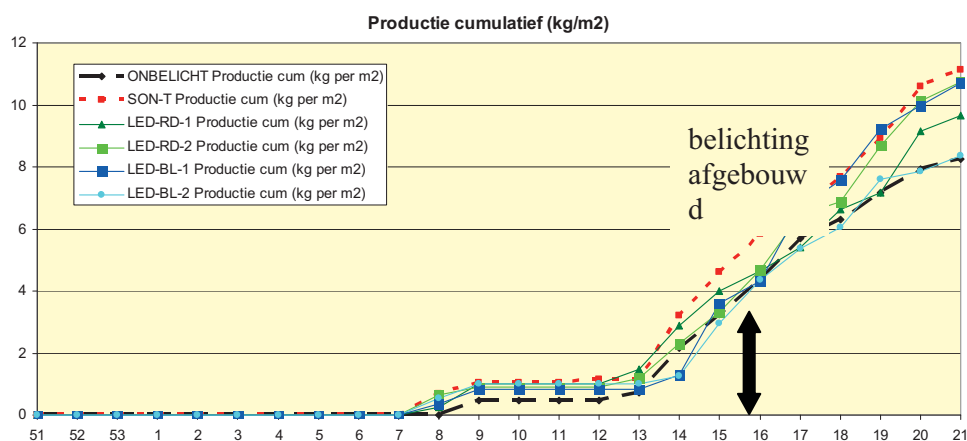
Voor verdere discussie van de resultaten zie Eindbespreking in laatste paragraaf in dit hoofdstuk.

Productie & na-effect op de productie

Productie werd aanvankelijk gevolgd tot week 15. Daarna is besloten om te bekijken of er ook een na-ijl effect op de productie was.



Figuur 18. Productie ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{week}$).



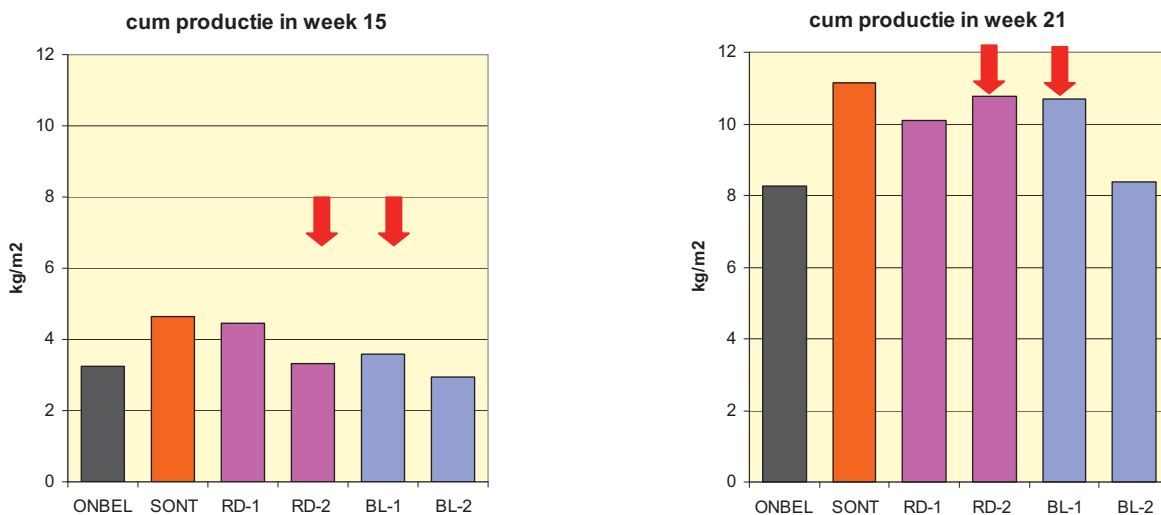
Figuur 19. Cumulatieve productie (kg/m^2).

- Vroege productie was het hoogste in SON-T, direct gevolgd door RD-2 & 1.
- Productie eerst zetsel in BL-1 lager en later, maar bij tweede zetsel juist hoger
- BL-2 en vooral ONBL bleven achter (hadden ook laagste lichtniveau)
- Cumulatieve productie in week 16 en week 21 was het hoogst voor SON-T.
- In week 21 was de volgorde: SON-T hoogste, gevolgd door RD-2 en BL-1.
- BL-1 had toen een inhaalslag gemaakt (dankzij groter bladoppervlak, zie verder).

Voor verdere discussie van de resultaten zie Eindbespreking in laatste paragraaf in dit hoofdstuk.

Cumulatieve productie in week 15 en 21

De cumulatieve productie is weergegeven in Figuur 20. Week 15 (tot 10 april) was nadat de belichting afgebouwd was. Week 21 (tot 22 mei) is gekozen zodat eventuele na-effecten van belichting zichtbaar konden worden.



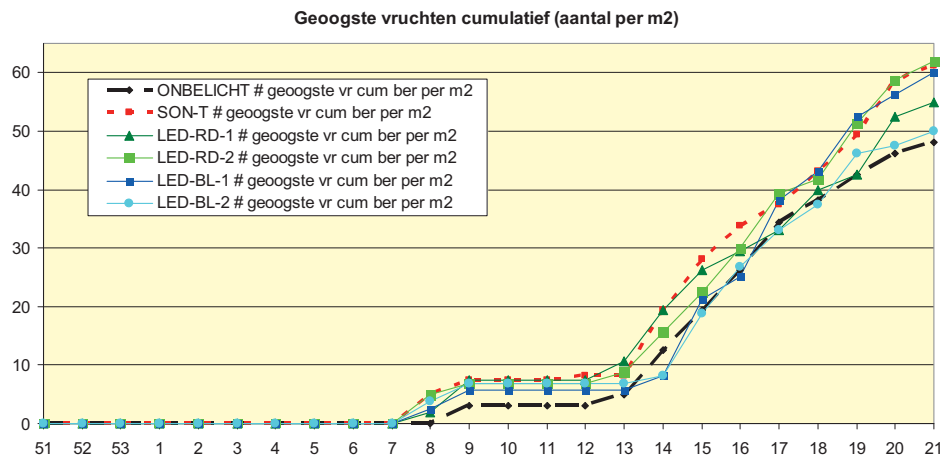
Figuur 20. Productie (kg/m^2) in week 15 en 21.

In week 15 was de cumulatieve productie het hoogst in SON-T, gevolgd door RD-1, en het laagst in BL-2 en ONBL. In week 21 was de cumulatieve productie nog steeds het hoogste in SON-T, maar nu volgden RD-2 en BL-1. De laagste productie hadden nog steeds BL-2 en ONBL.

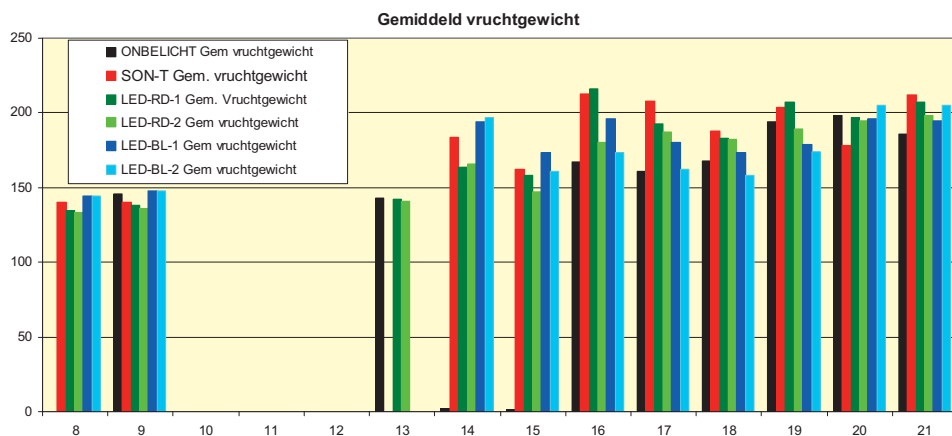
Het was opvallend dat RD-2 en BL-1 een inhaalslag hadden gemaakt, en dat RD-1 relatief iets was teruggevallen. De verschillen hebben te maken met de eerder beschreven verschillen in bladoppervlak (LAI was hoog onder BL-1).

Voor verdere discussie van de resultaten zie Eindbespreking in laatste paragraaf in dit hoofdstuk.

Vruchtgewicht en aantal vruchten



Figuur 21. Cumulatieve oogst in aantal per m².



Figuur 22. Gemiddeld vruchtgewicht (gram).

Het aantal geogoste vruchten volgde dezelfde trend als geogost gewicht. Het gemiddeld vruchtgewicht uit de gewasregistratie door de teler is weergegeven in Figuur 22. Tot week 15 waren de vruchten in BL-1 & 2 een paar procent zwaarder dan in RD-1 & 2. Het aantal vruchten was klein, maar (daardoor) het individueel vruchtgewicht iets groter. Vanaf week 14 waren de vruchten in SON-T en/of RD-1 & 2 vaak de zwaarste. Vruchten uit ONBL waren relatief licht, behalve in week 20.

Voor verdere discussie van de resultaten zie Eindbespreking in laatste paragraaf in dit hoofdstuk.

Uitgroeiduur

Op 13 februari en op 12 maart werden 40 vruchten per behandeling gelabeld, met op het label de datum van vruchtzetting. Bij het oogsten schreef de teler de oogstdatum op het label. Vervolgens werd hieruit de uitgroeiduur berekend. (Opmerking: in februari waren behandeling 5 en 6 bij elkaar genomen).

Tabel 9. *Uitgroeiduur van de vruchten bepaald in februari en maart.*

Behandeling	In februari gezet		In maart gezet	
	Aantal vruchten	Uitgroeiduur	Aantal vruchten	Uitgroeiduur
ONBL	40	53	38	42
SON-T	40	48	38	43
RD-1	33	53	40	45
RD-2	4		39	43
BL-1	19	51	23	44
BL-2			36	44

In februari had SON-T de kortste uitgroeiduur, gevolgd door BL-1. Bij RD-2 kwamen te weinig gelabelde vruchten terug. In maart waren de verschillen klein, nl 3 dagen verschil (minder dan 10%) tussen de snelste en de langzaamste uitgroeiduur.

Er is een samenhang tussen aantal vruchten, vruchtgewicht en uitgroeiduur. Bij ONBL en SON-T in februari is het aantal gezette vruchtjes precies gelijk, en dus kan de uitgroeiduur vergeleken worden. Bij SON-T was de uitgroei 10% sneller, waarschijnlijk door de hogere beschikbaarheid van assimilaten bij het hogere lichtniveau.

Opvallend is dat BL minder zetting vertoont dan ONBL in februari en ook in maart. In maart had BL-1 een slechtere zetting dan BL-2.

Dit onderwerp wordt uitvoerig besproken in de Einddiscussie (zie laatste paragraaf in dit hoofdstuk).

Zetmeelgehalte van de bladeren

Materiaal en methode

Zetmeelbepaling

- Op 27 januari en 13 februari om 10:00 uur werden 10 bladeren per behandeling bemonsterd.
- Blad is genomen dat in het licht hing, ca 15 cm onder de kop, bij de eerste bloem in oksel van de hoofdstengel.
- Bladmonsters van BL-1 & 2 waren gecombineerd .
- Op 27 januari werden de monsters genomen ca 10:00.
- Op 13 februari werden vijf monsters genomen om 10:00 uur, en twee extra monsters om 14:30 uur (zie tabel).
- Materiaal is direct ingevroren bij -20 °C, bewaard bij -70 °C en getransporteerd bij -18 °C.
- Vervolgens is het gevriesdroogd en geanalyseerd door WUR-TBK

Miscoscopische waarneming

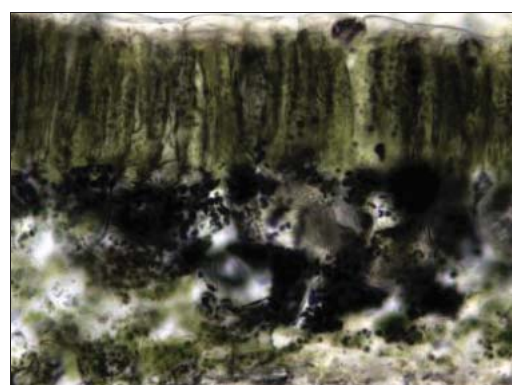
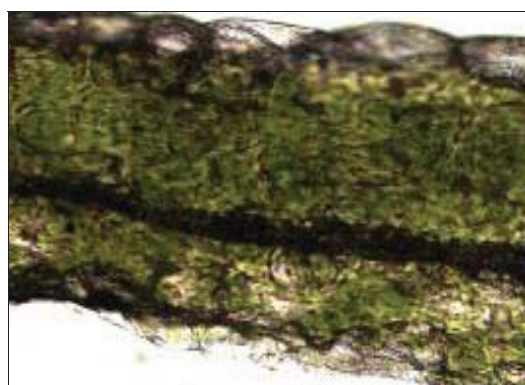
Ter illustratie van de zetmeelbepaling in het laboratorium is getracht de zetmeel zichtbaar te maken door foto's van bladcoupes te maken via een microscoop. Op 31 maart 2009 werden bladeren bemonsterd, coupes werden gemaakt en gekleurd met een jodiumverbinding. Onder de microscoop werden in de coupes van BL-2 grote zwarte vlekken aangetroffen, die de zetmeelkorrels onzichtbaar maakten (foto hieronder).

Resultaten

Tabel 10. Zetmeelgehaltenes in bladeren op 27 januari en 13 februari 2009, in mg zetmeel per gram droge stof.

Behandeling	27 jan	13 feb
	Zetmeel (mg/g)	Zetmeel (mg/g)
ONBELICHT	88.2	44.7
SON-T	106.1	54.9
RD-1	88.9	62.5
RD-2	75.3	54.9
BLAUW 1 & 2 GEMENGD	65	45.3
BL-1 (bemonsterd 14:30)		(63.6)*
BL-2 (bemonsterd 14:30)		(59.9)*

* Deze monsters zijn om 14:30 verzameld; alle andere om 10:00.



Figuur 23. Dwarsdoorsnede van blad uit behandeling Onbelicht (links) en RD-1 (rechts). De kleine zwarte stippen zijn vermoedelijk zetmeelkorrels.

Resultaten

Op 27 januari is het zetmeelgehalte in SON-T verhoogd t.o.v. ONBL, en is BLAUW enigszins verlaagd (Tabel 10). RD-1 zit op hetzelfde niveau als ONBL, terwijl RD-2 iets lager uitkomt. Op 13 februari blijkt dat het zetmeelgehalte in RD-1 is behoorlijk verhoogd t.o.v. ONBL. Ook SON-T en RD-2 verhogen het zetmeelgehalte. Een mengsel van BL-1 en BL-2 geeft een laag zetmeelgehalte te zien.

Op dezelfde dag maar een paar uur later zijn twee aparte monsters van BL-1 en BL-2 genomen. Deze zetmeelgehaltenes zijn veel hoger dan van het gecombineerde mengsel. Dit is waarschijnlijk een gevolg van het tijdstip van de dag. Bemonstering in de morgen geeft het effect van de belichting weer, terwijl bemonstering in de middag ook het effect van daglicht bevat. De lichtkleur zal hierbij een rol spelen (zie onder).

Bespreking van waargenomen zetmeeldata

De bepalingen in het laboratorium geven lichte aanwijzingen dat het zetmeelgehalte hoger was bij SON-T en RD en lager bij BL in vergelijking met ONBL. Voor een fysiologische verklaring moeten verschillende stappen beschouwd worden. Ten eerste de aanmaak van assimilaten: deze zal sneller zijn bij hogere lichtintensiteit. Ten tweede de verwerking en afvoer uit het blad van assimilaten en de omzetting suiker/zetmeel en zetmeel/suiker (sucrose en glucose). De omzetting wordt mogelijk beïnvloed door lichtkleur, waarbij het blijkt dat blauw licht de hydrolyse van zetmeel stimuleert (Taiz & Zeiger, 2006) en dat rood/blauw verhouding van LED licht een effect heeft op suiker/zetmeel verhouding in bladeren (Sanwo et al, 1995). In Tabel 10 lijkt de tendens aanwezig van lager zetmeelgehalte bij BL.

Verder hangt ophoping van assimilaten af van de snelheid van aanmaak, de sterkte van de vraag naar assimilaten, floeemstroom (beschikbaarheid van vrij water), weerstanden in het transport traject. De temperaturen van het blad en van de ontvangende organen (o.a. vruchten, kop) spelen hierbij zeker een rol. Aanbevolen wordt de rol van lichtkleur in het suiker/zetmeel metabolisme, nader te onderzoeken.

Eindbespreking van waargenomen groei en productie

In week 15 was de cumulatieve productie het hoogst in SON-T, gevolgd door RD-1, en het laagst in BL-2 en ONBL. In week 21 was de cumulatieve productie nog steeds het hoogste in SON-T, maar nu volgden RD-2 en BL-1. De laagste productie hadden nog steeds BL-2 en ONBL. De productie volgt daarmee de lichthoeveelheid. Productie wordt in detail geanalyseerd in Deel 2.

Afgezien van productie trends, zijn in deze proef een paar waarnemingen gedaan die speciale aandacht vragen.

Opvallend is dat BL minder zetting gaf dan ONBL in februari en maart, hoewel BL-1 en BL-2 in februari wel een week eerder zetten dan ONBL (zie Figuur 15). In maart had BL-1 een slechtere zetting dan BL-2, nadat BL-1 sinds eind januari meer uren per dag had dan BL-2. Dit kan erop duiden dat blauw licht de zetting remt (stuurlichteffect). Het is ook mogelijk dat assimilatenbeschikbaarheid een rol speelt. Omdat bij BL de eerste zetting wel een week eerder was dan bij ONBL. Het kan zijn dat de eerste zetting remmend werkte op zetting van de volgende bloemetjes.

Ook opvallend is dat BL-1 de hoogste SLA gaf (d.w.z. dat de bladeren hier het meest gestrekt waren), en de meeste lengtegroei. Bij SON-T waren die relatief laag. Deze waarnemingen zijn tegenstrijdig met wat in de literatuur te vinden is. Blauw licht zou de strekkingsgroei remmen, en verder staat blauw licht bekend om het effect van aanmaken van zonnebladeren (kleine dikke bladeren). Voor beide zie literatuurstudie, Schapendonk, 2009.

Bovendien bleek dat BL goed presteerde (sterke vegetatieve groei en hoge productie) tegen het einde van de proef. Het is verleidelijk om dit te wijten aan de lichtkleur. Omdat het ingaat tegen wat bekend is uit de literatuur, is het gevaarlijk om deze conclusie te trekken uit deze proef in enkelvoud. Bovendien waren in deze proef de lichtkleur en lichtintensiteit gekoppeld.

Een mogelijke verklaring hiervoor volgt hieronder, en omvat verschillende aspecten. Belangrijk is dat LED-BL een lagere lichtintensiteit had dan LED-RD en SON-T, maar wel hoger dan ONBL. Bij LED-BL-2 was de belichtingsduur kort, dus de lichtsom extra kort.

Effecten van blauwe LEDs in het begin en halverwege het belichtingsseizoen

(1) De vroege zetting bij BL-1 was matig in vergelijking met RD en SON-T, en ook lager dan bij ONBL, maar wel een week eerder dan bij ONBL. Dit kan komen door het lichtniveau: het beetje extra licht was genoeg om de zetting iets te vervroegen in vergelijking met ONBL.

(2) Het is een bekend verschijnsel dat lage lichtintensiteit leidt tot 'schaduwbladeren' (groter maar dunner blad, dus hogere SLA). De lichtintensiteit bij BL was wel iets verhoogd, maar nog steeds laag (17 micromol/m²/s), dus blad bij BL ging meer strekken dan bij RD en SON-T. Bovendien hadden ze een lagere lichtsom (vooral BL-2 vanwege korte belichtingsduur). Dus korte tijd een prikkel met weinig licht stimuleert bladstrekking. Of de lichtkleur hierbij een rol speelt is onbekend.

(3) Bij paprika is bekend dat jonge vruchten aan de plant stimulerend werken op de assimilatenvraag (zie ook deel 2, paragraaf 5.5, 'vliegwieleffect'). De bladeren konden alleen aan de grotere assimilatenvraag voldoen door meer licht op te vangen, dus door het bladoppervlak te vergroten ten koste van de bladdikte (dus verhogen van SLA).

(4) Doordat er niet heel veel vruchtjes gezet waren (in vergelijking met LED-RD en SON-T) bleven er assimilaten over voor vruchtuigroei.

Kennelijk was het effect van het betrekkelijk lage lichtniveau (nl SLA vergroten) sterker dan het effect van de blauwe lichtkleur om de SLA te verkleinen.

Effecten van blauwe LEDs in het naseizoen:

Bij paprika wisselen vruchtgroei en vegetatieve groei elkaar sterk af. Planten bij RD toonden vanaf het begin een behoorlijk goede zetting en productie, waardoor de groei van stengels en bladeren minder was. Bij BL was de zetting aanvankelijk moeizaam, en de vroege productie matig, maar de vegetatieve groei was (daardoor) beter.

Weinig licht stimuleert bladstrekking en dus leidde BL tot groter blad en grotere LAI in april. Dit geeft hogere lichtonderschepping en dus hogere assimilatenaanmaak. Assimilatenaanbod versterkt bladgroei (en ook zetting), enz.

Toen in april meer natuurlijk licht beschikbaar kwam, waren planten met groter bladoppervlak (BL) in het voordeel. Deze onderschepten meer licht, en dit versterkte het effect. Het grotere blad in LED-BL zorgde voor assimilatenaanmaak voor vruchten en bladeren. In april/mei was het bladoppervlak in BL-1 zelfs 44% groter dan bij SON-T. De betere lichtopvang in BL-1 verklaart de hoge productie op het eind en na beëindiging van het belichtingsseizoen.

Uitgroeiduur, aantal vruchten, vruchtgewicht

Vruchtgroei hangt af van relatief assimilatenaanbod en assimilatenbehoefte. Er is een samenhang tussen de driehoek aantal vruchten, vruchtgewicht en uitgroeiduur. Als er heel veel assimilaten zijn kunnen heel veel vruchten heel snel heel groot worden. Het aantal vruchten wordt deels gestuurd door de plant zelf, in afhankelijkheid van assimilatenaanbod. Het wordt ook deels gestuurd door de teler, die kiest op welke moment en op welke hoogte de vruchtjes mogen zetten. Hij kan ook besluiten om een bloemetje of jong vruchtje weg te halen. Een simulatiemodel biedt de mogelijkheid om de drie varianten (aantal vruchten, vruchtgewicht en uitgroeiduur) en hun onderlinge samenhang door te rekenen (zie deel 2).

Zetmeelgehalte

Bepaling van zetmeelgehalte van het blad in het laboratorium geven lichte aanwijzingen dat het zetmeelgehalte hoger was bij SON-T en RD en lager bij BL in vergelijking met ONBL. In de literatuur is te vinden dat blauw licht de hydrolyse van zetmeel stimuleert en dat rood/blauw verhouding van LED licht een effect heeft op suiker/ zetmeel verhouding in bladeren. Het lijkt de moeite waard om dit onderwerp, met name de rol van lichtkleur in het suiker/zetmeel metabolisme, nader te onderzoeken.

Conclusie

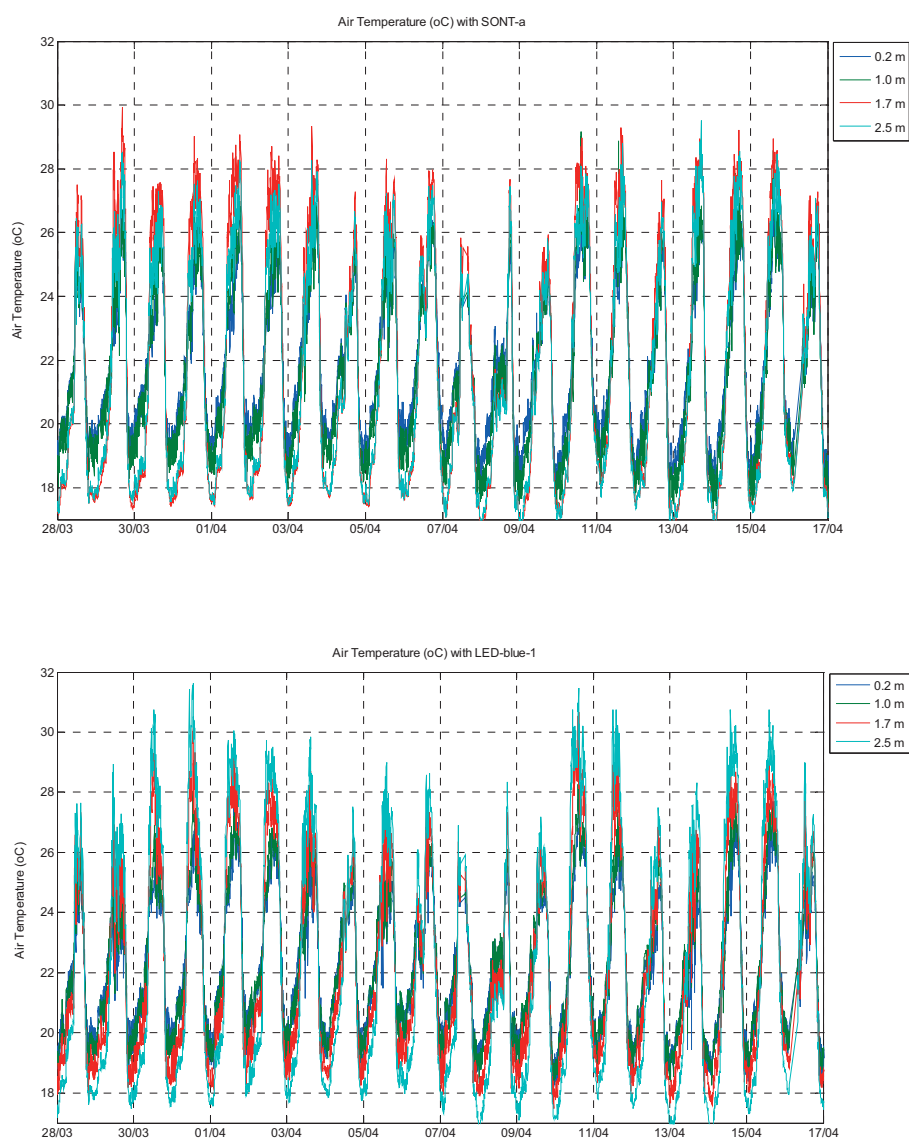
In hoofdlijn zijn de groei en productie bij paprika te verklaren door de lichtsom: meer licht (bij SON-T en RD) resulteerde in meer productie dan behandelingen met geen of weinig extra licht (ONBL, BL-2, BL-1).

De resultaten van deze proef kan alleen suggereren dat blauw licht een stuurlichteffect heeft. Zetting zou door alleen lichtintensiteit verklaard kunnen worden, maar mogelijk speelt lichtkleur ook een rol. Bladstrekking (grotere SLA) kan mogelijk veroorzaakt worden door een korte periode van een geringe hoeveelheid extra licht, zoals bij BL is gebeurd. Dit kan de bladstrekking stimuleren, met meer lichtonderschepping als gevolg. Uiteraard speelt assimilatenbeschikbaarheid steeds ook een rol: door meer licht zijn er meer assimilaten, en door minder zetting zijn meer assimilaten over voor vegetatieve groei.

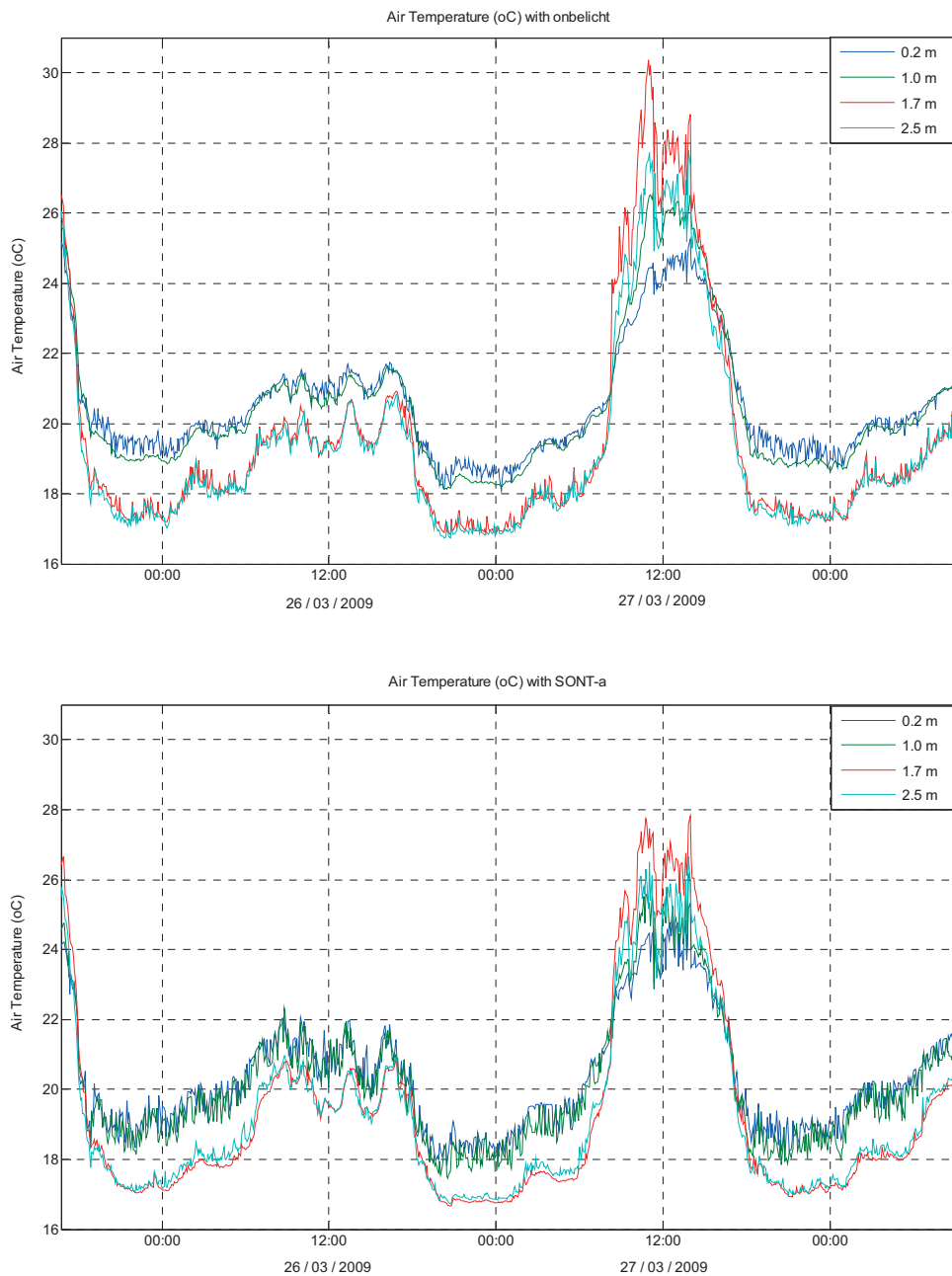
7 Temperatuur gradiënten

De temperatuur gradiënt van de kaslucht is gemeten op zes locaties in de proefvakken m.b.v. draadloze temperatuuropnemers en dataloggers (i4all). Vier identieke gekalibreerde meters waren geplaatst op vier hoogtes boven elkaar: 0,2, 1,0, 1,7 en 2,5 m boven de grond, in de gewasrijen. Hieronder twee voorbeelden van drie-weekse meetperiode. Vervolgens worden metingen in detail weergegeven.

Vergelijking van temperatuur op verschillende hoogtes



Figuur 24. Temperatuur gradiënt van de kaslucht bij SONT (bovenste grafiek) en LED-BL-1 (onderste grafiek). Temperatuur gemeten op vier hoogtes, tussen 28 maart en 17 april 2009. Dit zijn slechts twee voorbeelden.

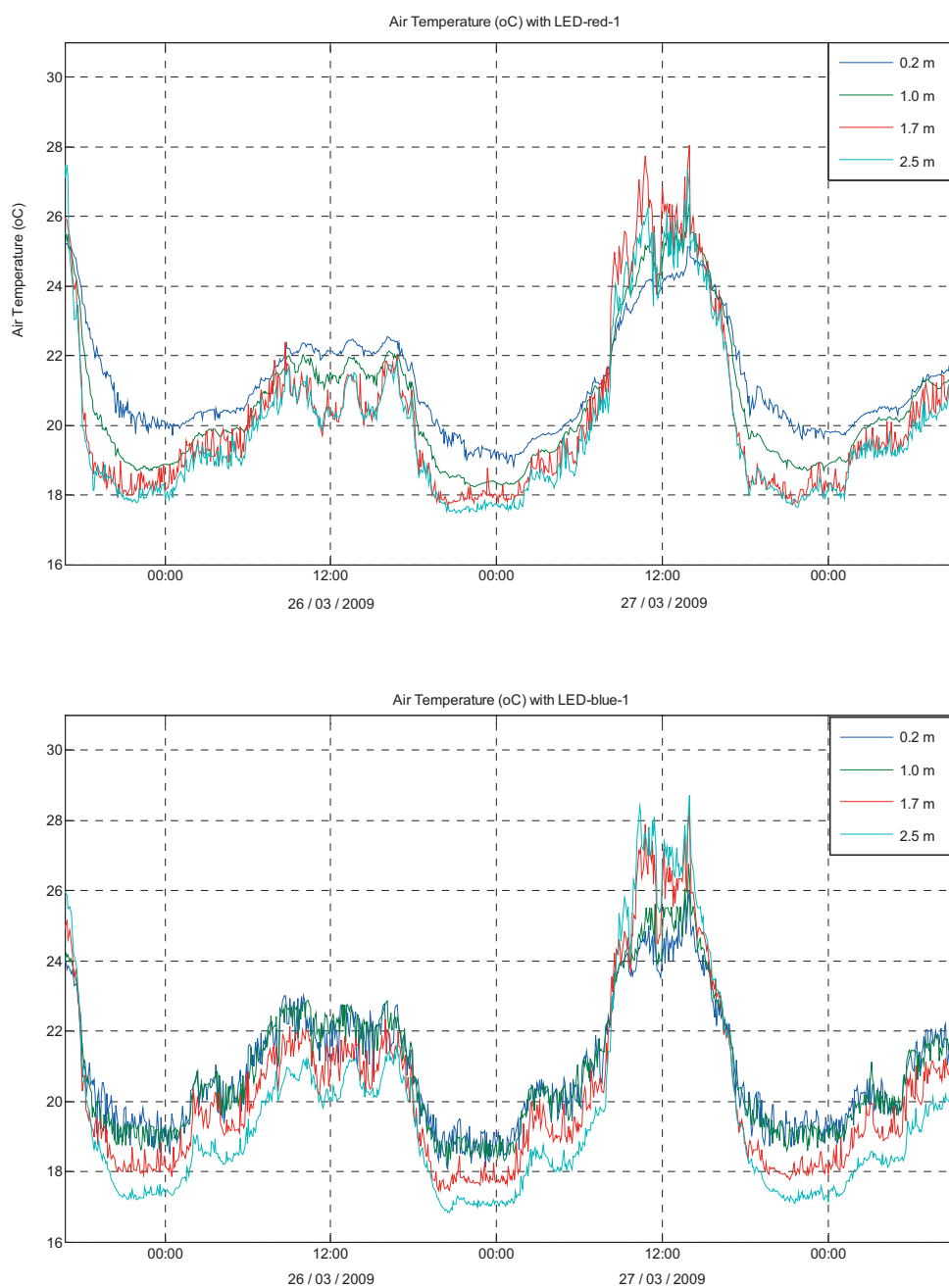


Figuur 25. Temperatuur gradiënt van de kaslucht bij ONBL (bovenste grafiek) en SON-T (onderste grafiek). Temperatuur gemeten op vier hoogtes, tussen 25 en 28 maart 2009.

Opvallend in bovenstaande grafieken is dat de metingen op de bovenste twee hoogtes (1,7 en 2,5 m) vrijwel samenvallen (geclusterd zijn) en dat ook die op 0,2 en 1 m geclusterd zijn. 's Nachts en op een bewolkte dag (26 maart) zijn de bovenste meetpunten soms bijna 2 graden koeler dan de onderste, omdat de verwarming onderin ligt.

Op een zonnige dag (27 maart) is meetplaats 1,7 m (in de top van het gewas) verreweg het warmste gevolgd door 2,5 m, en is het koeler onderin het gewas. Dit komt doordat de zon vooral de kop van het gewas opwarmt en dit verhoogt ook de luchttemperatuur. Meethoogte 2,5 m is boven het gewas, en hier wordt de zonnestraling niet omgezet in warmte. De buisverwarming staat dan op een laag pitje, dus onderin is het koeler.

Dit patroon is typerend voor ONBL en SON-T.

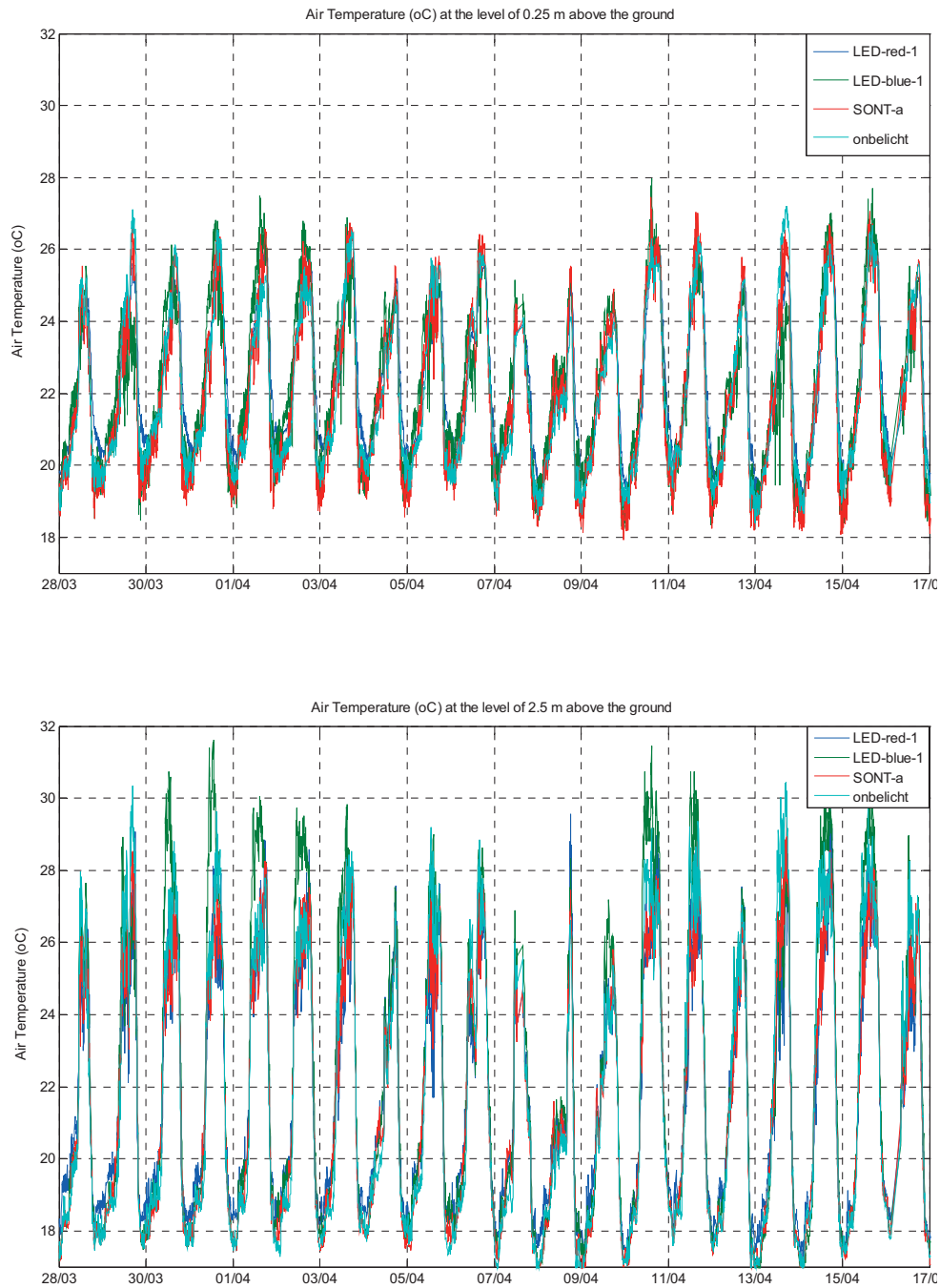


Figuur 26. Temperatuur gradiënt van de kaslucht bij LED-RD-1 (bovenste grafiek) en LED-BL-1 (onderste grafiek). Temperatuur gemeten op vier hoogtes, tussen 25 en 28 maart 2009.

In bovenstaande grafieken zijn er duidelijk regelmatige temperatuur gradienten aanwezig, zonder clustering van twee metingen zoals in de vorige twee grafieken. 's Nachts en op een bewolkte dag (26 maart) is het onderin ca 2 graden warmer dan bovenin, verklaarbaar door de verwarmingsbuizen die op grondniveau lagen (gewone buisrail + extra verwarmingsbuisje). Op een zonnige dag (27 maart) is de tempertuuropbouw andersom: in de top van het gewas is het ca 3 graden warmer dan bij de voet. Dit is verklaarbaar door aanwezigheid van zoninstraling en afwezigheid van warme buis.

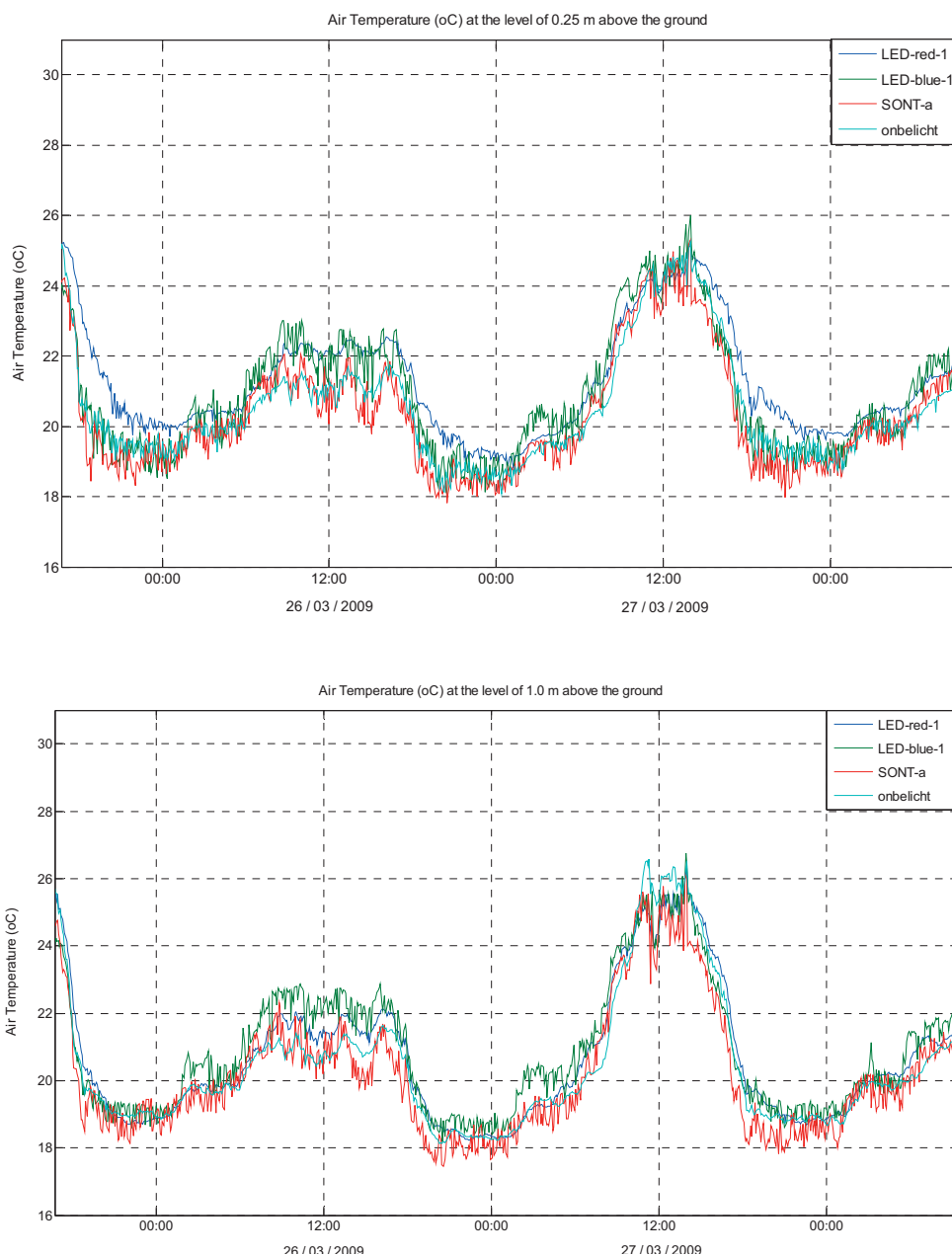
Dit globale patroon is typerend voor de metingen in ONBL en SON-T.

Vergelijking van temperatuur in de behandelingen



Figuur 27. Temperatuur metingen op hoogte 0,25 m hoogte (bovenste grafiek) en op 2,5 m hoogte boven de grond (onderste grafiek), gemeten in de vier belichtingsbehandelingen, tussen 28 maart en 17 april 2009.

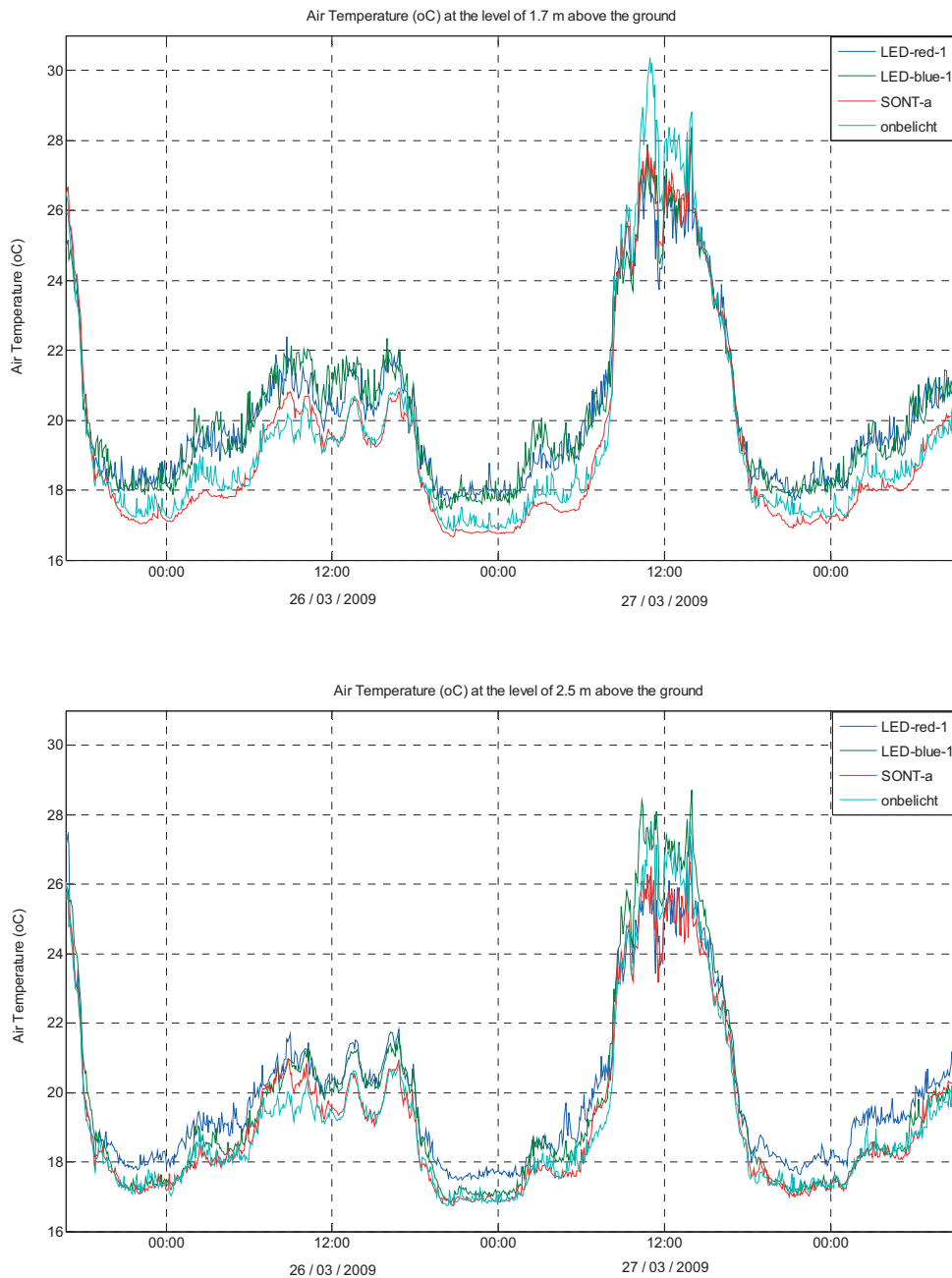
Deze grafieken zijn typerend voor alle hoogtes. Hieronder worden details uitgewerkt.



Figuur 28. Temperatuur metingen op hoogte 0,25 m boven de grond (bovenste grafiek) en op 1 m boven de grond (onderste grafiek), gemeten in de vier belichtingsbehandelingen, tussen 28 maart en 17 april 2009.

In bovenstaande grafieken is in de meeste gevallen de temperatuur het hoogste bij de LED behandelingen (BL en RD). Dit is het duidelijkst op hoogte 25 cm, dicht bij de verwarmingsbuizen, zowel overdag als in de nacht. Dit wordt verklaard doordat bij de LEDs een extra verwarmingsbuisje op de grond lag, wat gewoon meeliep met de normale buisverwarming en geactiveerd werd als de belichting aan ging.

Op hoogte 1 m zijn dezelfde patronen zichtbaar maar wat minder duidelijk dan op 0,25 m, vanwege de grotere afstand tot de verwarmingsbuizen.



Figuur 29. Temperatuur metingen op hoogte 1,7 m boven de grond (bovenste grafiek) en op 2,5 m boven de grond (onderste grafiek), gemeten in de vier belichtingsbehandelingen, tussen 28 maart en 17 april 2009.

Ook op hoogte 1,7 m en 2,5 m was de temperatuur meestal het hoogste bij de LED behandelingen (RD en BL), zowel overdag als 's nachts, behalve op 27 maart overdag (zonnige dag). Op 2,5 m heeft vooral LED-RD nog een wat hogere temperatuur dan de andere behandelingen.

Warmtebalans

De warmtebalans is het evenwicht tussen aan- en afvoer van warmte. De SON-T en LED behandelingen verschillen op een aantal punten. Van belang zijn de lampen (SON-T versus LEDs), de verwarming (extra buisje bij LEDs), koeling (een koude pijp bovenin werkt koelend) en mogelijk een verschil in verdamping (wat zorgt voor koeling van het gewas). De overige factoren zijn gelijk, omdat de behandelingen in een kas lagen (buis temperatuur, ventilatie, schermen, koeling tegen het kasdek, en luchtbeweging).

Er zijn metingen gedaan aan de aanvoer en afvoer temperaturen van het koelwater van de LEDs. Als de ingaande temperatuur 12 °C was, was de uitgaande ca 18 °C. De stroomsnelheid van het koelwater is globaal gemeten met een ingebouwde watermeter, en was ca 37,5 liter per minuut (225 liter per uur). Hieruit werd globaal de warmteafvoer berekend.

Bij de LEDs was extra warmtetoevoer d.m.v. een extra buisje dat mee liep met de gewone verwarming en met de belichting. Dit moest compenseren voor het warmtetekort bij de LEDs. Dit is uiteraard een tamelijk onverfijnde manier. De warmteaanvoer door het extra buisje en de warmteafvoer door de koeling waren van dezelfde orde grootte.

Opgemerkt kan worden dat de verwarming bij de LEDs onderin lag, terwijl de SON-T lampen bovenin zaten. De geconstateerde gradiënten in luchttemperatuur zijn daarom begrijpelijk.

De plaats van het verwarmingsbuisje bij de LEDs - op de grond - kan ter discussie gesteld worden. SON-T lampen zullen vooral de kop van het gewas beïnvloeden door stralingswarmte (en door convectieve warmte vanaf de armaturen. Echter, dit laatste effect is slechts gering doordat de afstand tussen lampen en gewas heel groot was: van 390 cm in het begin tot 260 cm op het einde). Als toch wordt aangenomen dat bij SON-T vooral de kop opgewarmd wordt, dan zou de aanvullende verwarming bij LEDs boven het gewas moeten liggen, en niet op de grond. Deze keuze was gemaakt omdat de teler zegt dat een paprikagewas niet houdt van verwarming bij de kop.

Waar het uiteindelijk om gaat is de gewastemperatuur. Deze is incidenteel gemeten en er bleek veel variatie in tijd te zijn, maar er zijn geen duidelijke verschillen tussen behandelingen gevonden. De gemeten gewastemperatuur d.m.v. Growwatches vertoonden sterke variatie in de tijd, maar laag dicht bij elkaar, met gemiddeld 0,4 °C hogere bladtemperatuur bij SON-T dan bij LED (zie Deel 2, rapport Plant Dynamics).

8 Evaluatie

Conclusies

De doelstellingen van dit project zijn deels beantwoord in dit onderzoek. In het kort zijn de antwoorden als volgt:

1. Wat is de toegevoegde waarde van LED-belichting in vergelijking met SON-T? Het gaat niet alleen om het momentane effect op de opbrengst, maar ook om de na-effecten op later gevormde vruchten, en de effecten daarvan op de vegetatieve groei.

De waarde van LEDs t.o.v. SON-T kan worden beoordeeld aan de productie per eenheid licht, ofwel 'gram per mol', de extra productie per hoeveelheid extra licht. Daarvoor is een Onbelichte behandeling nodig als referentie (zie Bijlage III). De waarde van LED in vergelijking met SON-T is berekend in Deel 2, zie 'Rendement'.

2. Is belichting met LEDs vóór zonop effectief, en leidt het tot energiebesparing? Door een aantal uren te belichten voor zonop wordt meer fotosynthese gerealiseerd en is het gewas eerder 'opgewarmd' (in staat optimaal te fotosynthetiseren). Ook wordt gebruik gemaakt van goedkopere stroom. Belichting met rode LEDs voor zonsopkomst verstoort de plantbalans en is daarom afgebouwd. Mogelijk is dit een gevolg van stuurlicht en is verder niet onderzocht.
3. Is een minimaal intensiteit blauw licht nodig voor de zetting en productie van paprika? Met alleen een kleine hoeveelheid blauw licht samen met (een lagere intensiteit van) SON-T zou het gewas beter kunnen groeien en ontwikkelen bij een lagere temperatuur. Dit leidt tot minder energieverbruik. Gedacht werd dat een drempelwaarde van circa 20 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ blauw licht een dergelijk stuurlicht effect zou geven. Belichting met 17 micromol/ m^2/s blauw had een paar opvallende effecten, bv lange planten, grote bladeren, hoge na-productie en laag zetmeelgehalte. De oorzaak is onduidelijk omdat het in tegenspraak is met de literatuur over effecten van blauw licht, en dat de effecten van lichtkleur en -intensiteit hier niet onderscheiden kunnen worden.

Vragen voor verder onderzoek

Het is de vraag of en hoe LEDs een hogere productie kunnen geven dan SON-T lampen bij gelijk lichtniveau. Om de productie onder LEDs te verhogen is het nodig dat nadelige effecten worden opgelost. Dit zijn deels specifieke problemen veroorzaakt door LEDs, en deels problemen die ook voorkomen bij SON-T of in onbelichte gewassen. Sommige zijn het gevolg van niet goed afgestemd zijn van teelttechniek op het type belichting. Enkele aspecten:

1. Gewastemperatuur:
 - 1.1. SON-T produceert warmtestraling (NIR) die op het gewas komt, terwijl bij LEDs de geproduceerde warmte wordt afgevoerd met koelwater. Dit heeft onvermijdelijk effect op de planten, bv
 - 1.2. Optimale temp voor fotosynthese is hoger bij meer licht.
 - 1.3. Hogere instraling verhoogt de verdamping (bladtemperatuur is een functie van straling & verdamping).
 - 1.4. Hogere temperatuur van het groeipunt versnelt de ontwikkeling (bladafsplitsing, bloem- of troswikkeling).
2. Plant-onbalans, onder LED belichting raakte planten soms uit balans (scheve sink/source verhouding, te generatieve gewasstand, enz). In principe kunnen beschikbare teelttechnieken gebruikt worden om de plantbalans bij te sturen. Hoe kan met teeltmaatregelen het best de plant in balans gehouden kan worden bij gebruik van LEDs.
3. Afwijkende bladeren, bv krullen bij komkommer, vochtblaadjes bij roos, bladrandjes bij tomaat (ook bij SON-T).

Onderzoeksvragen i.v.m. LEDs:

4. Hoe kan door gebruik van LEDs de productie beduidend verhoogd worden in vergelijking met gebruik van SON-T (bij gelijk lichtniveau in micromol/m²/s gemeten bij de kop van het gewas)?
5. Hoe is de absorptie door het blad en de doordringing in het gewas van LED licht (van relevant golflengtes)? Hoeveel licht komt er in het gewas terecht? Straalt veel naar boven en naar de grond?
 - 5.1. Hoe is de lichtverdeling? Wordt soms licht afgeschermd door een enkele blad?
 - 5.2. Hoe is de lichtreflectie en -absorptie door het gewas?
 - 5.3. Verandert de spectrale samenstelling door selectieve absorptie van bepaalde lichtkleuren?
 - 5.4. Bij tussenbelichting, behouden bladeren in onderste bladlagen langer een hoge fotosynthese capaciteit?
6. Hoe is de absorptie van NIR? Hoe is dit voor specifieke hoogtes in het gewas? Hoeveel opwarming treedt op door absorptie van PAR en NIR (met inachtneming van de verdamping)? Wat is het effect op de temperatuur van het blad en van het groeipunt? Wat voor effect heeft dit op de energiebalans van een blad/plant/gewas?
7. Welk effect heeft LED licht (van relevante golflengte) op stomataire geleidbaarheid? Verandert het huidmondjesgedrag o.i.v. het type belichting, m.a.w. treedt aanpassing op?
8. Welke verschillen bestaan tussen tussenbelichting met LEDs en bovenbelichting met LEDs? Dit hangt af van gekozen optische technieken (lenzen, spiegels). Hierbij moet de absorptie van licht worden bestudeerd (zie boven).
9. Welke verschillen bestaan tussen tussenbelichting met LEDs en bovenbelichting met SON-T? Hierbij moet de absorptie van licht en de absorptie van NIR worden bestudeerd (zie boven).
10. Hoe kan de droge stof verdeling gunstig worden beïnvloed (d.w.z. relatief meer assimilaten in de vruchten) door toepassing van LEDs en met goede afstemming van teelttechnische maatregelen (optimaliseren van teelthandelingen)? m.a.w. hoe kunnen problemen worden voorkomen van plant-onbalans, assimilatenoverschot in bladeren, scheve sink/source verhouding, generatieve of vegetatieve gewasstand?
11. Wat is het effect van het aanvangstijdstip van belichting, bv wat is het verschil tussen belichting starten vóór of na zonsopkomst? Wat is het effect van belichtingsduur en hoe verhoudt zich dat met de natuurlijke daglengte?
12. Is belichting gunstig bij "telen van licht af" (bij afnemend natuurlijke licht)? Bij "telen met het licht mee" (planten na de kortste dag) helpt belichting om groter bladoppervlak te maken, wat helpt om meer daglicht op te vangen. Maar bij "telen van licht af" kost de grote bladmassa veel onderhoud en levert weinig extra licht op.
13. Verder zijn er heel veel vragen over lichtkleur die in kleinschalige proeven onderzocht kunnen worden.

9 Referenties

- Nederhoff E., P. de Boer, A. Schapendonk, S. Pot & T. Dueck, 2009a.
Tomaten telen onder LED belichting in de praktijk. Rapport 286, Wageningen UR Glastuinbouw (in druk).
- Paradiso R., E. Meinen, J. Snel, W. van Ieperen, S. Hogewoning & L. Marcelis, 2010.
Light use efficiency at different wavelengths in rose plants. Acta Hort. (in druk).
- Sanwo M.M., G.D. Goins, N.C. Yorio & C.S. Brown, 1995.
Changes in leaf carbohydrate metabolism in wheat plants grown under red and blue light. Plant Physiol. 114:
81.
- Snel J. 2010.
Fotosynthese-efficiency bij verschillende lichtkleuren'. Rapport Wageningen UR Glastuinbouw (in voorbereiding).
- Taiz L & E. Zeiger
Plant Physiology, fourth edition. Chapter 18. Sinauer Associates Inc.

Bijlage I.

Details plantwaarnemingen

Plantwaarnemingen in december 2008

Op 16 december 2008 (ca 3 weken na planten) werden planten geoogst en gedroogd (één dag bij 70°C en één dag 105°C). De planten hadden gemiddeld 2 bloemknoppen plus 1 gezette bloem per stengel.

Tabel I-1. Plantwaarnemingen op 16 december 2008 (ca 3 weken na planten).

Paprika	Onder de splitsing	Boven de splitsing	Totaal
Lengte (cm)	39	9	
Aantal bladeren	9	20	
Bladoppervlak (cm ²)	1099	636	1736
Vers gewicht blad (g)	35.2	14.8	50,0
Droog gewicht blad (g)	3.37	1.76	5.13
Versgewicht stengel (g)	22.2	3.7	25.9
Droog gewicht stengel (g)	2.18	0.3	2.48
Vers gewicht knop (g)		0.44	0.44
Droog gewicht knop (g)		0.075	0.075
Versgewicht plant totaal (g)			75.9
Droog gewicht plant totaal (g)			7.61

Plantwaarnemingen 27 januari 2009

Bemonstering

- Per behandeling zijn 10 bladeren gemonsterd voor bepaling van bladparameters zoals versgewicht, drooggewicht, bladoppervlak, lengte en breedte van blad.
- Gemonsterd werden de eerste (bijna) volgroeide bladeren, nl het grote blad bij eerste bloem aan de hoofdstengel.
- Het aantal bladeren is geteld aan 5 stengels (boven + onder splitsing). Hierbij zijn 3 kleine blaadjes geteld als 1 blad, en 2 middelmaat blaadjes als 1.
- De LAI is geschat zonder planten te vernietigen (methode zie Bijlage III).
- De berekende LAI varieerde van 1.9 tot 2.2. De verschillen tussen behandelingen waren niet betrouwbaar. Daarom is gekozen om voor alle behandelingen een LAI van 2,0 aan te houden.
- Voor zetmeelbepaling werden 10 bladeren per behandeling gemonsterd. Resultaten in Bijlage V.

Tabel 1-2. *Bladparameters op 27 januari 09 gemeten van jonge vrijwel volgroeide bladeren. SLA = Specific Leaf Area, bladoppervlak per gram bladgewicht (cm²/g). Zie ook grafieken in Figuur 7 – 9.*

Behandeling	Vers Gewicht (g)	Droog Gewicht (g)	Opp. (cm ²)	SLA (cm ² /g)	Aantal bladeren
ONBELICHT	3.71	0.42	142.3	341.1	25.7
SON-T	3.16	0.37	119.0	322.9	26.9
RD-1	3.82	0.44	129.1	302.1	28.8
RD-2	3.67	0.45	125.8	283.7	25.5
BL-1,2	3.71	0.44	138.5	323.0	26.7

* *Bladmonsters van de vakken BL-1 en BL-2 waren gecombineerd.*

Plantwaarnemingen 13 februari 2009

Algemeen

- Extra meting om te beoordelen of aanpassing van belichting op 27 januari effect had gehad
- Er hingen voor het eerst genoeg vruchten om te labelen voor vruchtuigroei duur.
- Vruchten waren bijna oogstbaar. Er groen geoogst gaan worden om planten te ontlasten.
- Zie foto's van de koppen van de planten in Bijlage IV
- Voor bepaling van uitgroei duur werden 40 vruchten gelabeled. Resultaten in Tabel 9.

Visuele beoordeling

- Planten in RD-2 leken grotendeels te herstellen.
- De kop was niet meer zo duidelijk 'plat' als eind januari
- Blad bovenin de planten was lichter groen van kleur geworden
- Blad onderin de planten was nog wel donkerder groen dan bij andere behandelingen.

Bemonstering

- Per behandeling zijn 10 bladeren gemonsterd voor bepaling versgewicht, drooggewicht, bladoppervlak, lengte en breedte van blad.
- Hiervoor werden de bovenste bijna volgroeide bladeren genomen, nl bladeren aan de hoofdstengel bij de eerste en/of tweede bloem.
- Het aantal bladeren is geteld, waarbij 2 kleine blaadjes geteld zijn als één
- De LAI is geschat zonder planten te vernietigen (methode zie Bijlage III).
- De berekende LAI varieerde heel weinig en de verschillen tussen de behandelingen waren niet betrouwbaar. Daarom is gekozen om voor alle behandelingen een LAI van 2,2 aan te houden.
- Opnieuw werden 10 bladeren per behandeling geplukt voor zetmeelbepaling (resultaat in Bijlage V).

Tabel I-3. *Bladparameters op 13 februari 09 gemeten aan jonge vrijwel volgroeide bladeren. SLA = Specific Leaf Area, oppervlak per gewicht, een maat voor bladstrekking (cm²/g). Zie ook grafieken in Figuren 7-12.*

Behandeling	Vers Gewicht (g)	Droog Gewicht (g)	Opp. (cm ²)	SLA (cm ² /g)	Aantal bladeren
ONBELICHT	3.46	0.45	121.7	276	28.0
SON-T	3.22	0.40	107.4	267	29.6
RD-1	3.23	0.39	109.4	283	28.7
RD-2	3.30	0.40	107.3	266	30.9
BL-1	3.70	0.44	131.2	300	30.2
BL-2	3.52	0.45	123.7	279	28.4

Plantwaarnemingen in maart 2009

Bemonstering

- Op 12 maart werden:
 - 10 bladeren per behandeling bemonsterd voor meting van bladparameters
 - Voor bepaling van de bladparameters werden 10 bladeren per behandeling geplukt. Dit waren jonge vrijwel volgroeide bladeren onder het derde internodium dat groter was dan 2 cm.
 - 40 vruchten van 2 cm gelabeld voor tweede serie bepaling van uitgroeiduur
 - 50 vruchten gelabeld voor bepaling droge stof gehalte in verschillende ontwikkelingsstadia
- Op 20 maart werd het aantal bladeren geteld, en lengte & breedte van bladeren gemeten voor LAI bepaling. Dit waren grote bladeren onderin het gewas.
- Op 31 maart zijn bladeren geoogst om bladcoupes te maken ivm zetmeelgehalte

Tabel I-4. *Bladparameters op 12 maart 09 gemeten aan 10 jonge vrijwel volgroeide bladeren. SLA = Specific Leaf Area, oppervlak per gewicht, een maat voor bladstrekking (cm²/g). Zie ook grafieken in Figuren 7-8.*

Behandeling	Vers Gewicht (g)	Droog Gewicht (g)	Opp. (cm ²)	SLA (cm ² /g)	Aantal bladeren p.stengel	LAI
ONBELICHT	4.2	0.72	137	202.0	33.0	3.2
SON-T	3.6	0.55	112	209.0	31.7	3.0
RD-1	3.6	0.55	112	207.5	30.2	2.9
RD-2	3.7	0.53	115	224.3	31.8	2.9
BL-1	3.9	0.57	127	225.8	31.6	3.1
BL-2	4.0	0.59	133	228.8	30.0	3.0

Plantwaarnemingen 14 april 2009

Bemonstering

Op 14 april werden:

- 10 bladeren per behandeling verzameld (grote blad onder derde internodium groter dan 2 cm). Bepaald werden de bladparameters zoals vers- en drooggewicht, bladoppervlak.
- het aantal bladeren geteld, en lengte & breedte gemeten voor LAI bepaling

- labels verzameld voor tweede serie bepaling van uitgroei duur
- droge stof gehalte van vruchten in verschillende ontwikkelingsstadia bepaald (continuering)
- de LAI geschat (zoals beschreven in bijlage II). Hiervoor is het blad genomen boven het 9e internodium boven de splitsing van de stengel.

Tabel I-5. *Bladparameters op 14 april 09 gemeten aan 10 jonge vrijwel volgroeide bladeren. SLA = Specific Leaf Area, oppervlak per gewicht, een maat voor bladstrekking (cm²/g). Zie ook Figuren 7 – 8.*

Behandeling	Vers Gewicht (g)	Droog Gewicht (g)	Opp. (cm ²)	SLA (cm ² /g)	aantal bladeren p.stengel	LAI
ONBELICHT	3.6	0.50	101	207.7	34.8	3.3
SON-T	3.0	0.43	78	183.9	32.7	3.0
RD-1	3.1	0.44	80	186.2	35.2	3.4
RD-2	2.9	0.41	82	202.6	36.2	3.1
BL-1	3.4	0.47	98	213.6	36.1	3.8
BL-2	3.5	0.52	97	190.1	35.1	3.4

Plantwaarnemingen 15 mei 2009

Bemonstering

- Per behandeling werden 10 bladeren verzameld (grote blad onder derde internodium groter dan 2 cm), voor bepaling van vers- en drooggewicht, bladoppervlak. Dit was niet het eerste volgroeide blad, maar een aantal internodiën lager. Bovenin de plant zat veel klein blad.
- Het aantal bladeren werd geteld de lengte & breedte gemeten voor LAI bepaling
- Labels verzameld werden voor tweede serie bepaling van uitgroei duur
- De LAI werd geschat aan bladeren genomen boven het 9e internodium boven de splitsing van de stengel. Oppervlakte van een volgroeid blad is bepaald aan 5 bladeren per behandeling.

Tabel I-6. *Bladparameters op 15 mei 09 gemeten aan 10 jonge vrijwel volgroeide bladeren. SLA = Specific Leaf Area, oppervlak per gewicht, een maat voor bladstrekking (cm²/g). Zie ook Figuren 7 – 8.*

Behandeling	Vers Gewicht (g)	Droog Gewicht (g)	Opp. (cm ²)	SLA (cm ² /g)	aantal bladeren p.stengel	LAI
ONB	2.7	0.42	58	145.2	41.4	3.90
SON-T	2.8	0.42	64	160.5	43.2	3.05
RD-1	2.9	0.48	66	142.5	47.4	3.63
RD-2	2.9	0.43	65	153.8	46.8	3.39
BL-1	2.9	0.41	69	172.5	45.8	4.42
BL-2	2.6	0.44	61	139.2	41.4	4.11

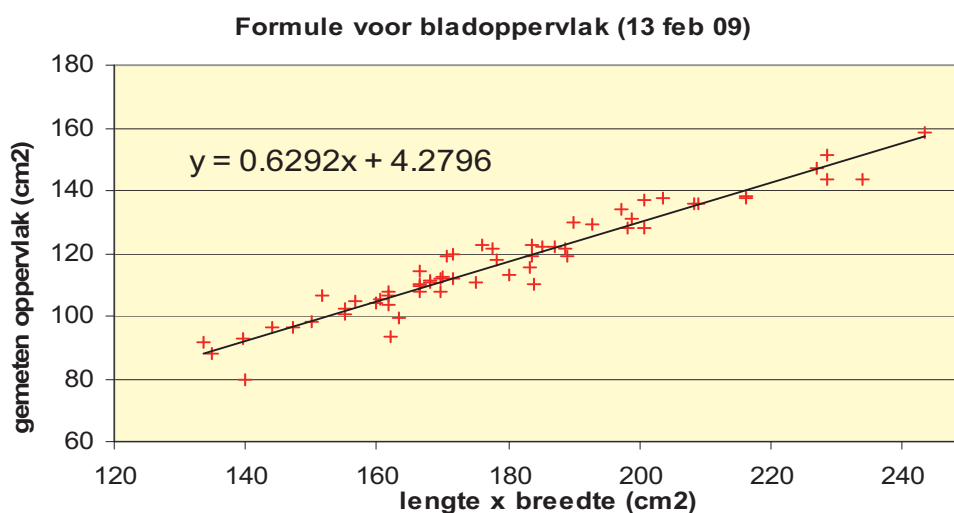
Tabel I-7. *Plantwaarnemingen gemiddelden en standaardafwijkingen van bladparameters. Voor resultaten in grafiekvorm zie Figuur 7.*

27 jan	Beh	Gem.		Gem.	St.afw.	Gem.	St.afw.	Gem.	St.afw.
		Vers gewicht (g)	Vers gewicht (g)	Droog gewicht (gram)	Droog gewicht (gram)	Opp. (cm ²)	Opp. (cm ²)	SLA	SLA
27 jan	ONB	3.7	0.7	0.42	0.08	142	22	341	46
27 jan	SON-T	3.2	0.6	0.37	0.07	119	16	323	31
27 jan	RD-1	3.8	0.5	0.44	0.08	129	12	302	46
27 jan	RD-2	3.7	0.6	0.45	0.07	126	18	284	41
27 jan	BL-1	3.7	0.8	0.44	0.12	138	28	323	33
27 jan	BL-2								
13 feb	ONB	3.5	0.7	0.45	0.09	122	19	276	20
13 feb	SON-T	3.2	0.4	0.40	0.04	107	11	267	21
13 feb	RD-1	3.2	0.3	0.39	0.03	109	10	283	19
13 feb	RD-2	3.3	0.6	0.40	0.07	107	18	266	22
13 feb	BL-1	3.7	0.5	0.44	0.05	131	14	300	17
13 feb	BL-2	3.5	0.5	0.45	0.07	124	12	279	17
12 mrt	ONB	4.2	0.8	0.72	0.22	137	27	202	52
12 mrt	SON-T	3.6	0.4	0.55	0.11	112	12	209	32
12 mrt	RD-1	3.6	0.3	0.55	0.09	112	10	208	32
12 mrt	RD-2	3.7	0.4	0.53	0.12	115	12	224	47
12 mrt	BL-1	3.9	0.6	0.57	0.10	127	13	226	32
12 mrt	BL-2	4.0	0.4	0.59	0.09	133	16	229	26
14 apr	ONB	3.6	0.2	0.50	0.09	101	9	208	47
14 apr	SON-T	3.0	0.5	0.43	0.09	78	10	184	20
14 apr	RD-1	3.1	0.5	0.44	0.07	80	5	186	25
14 apr	RD-2	2.9	0.4	0.41	0.06	82	7	203	27
14 apr	BL-1	3.4	0.5	0.47	0.09	98	11	214	36
14 apr	BL-2	3.5	0.4	0.52	0.08	97	12	190	26
15 mei	ONB	2.7	0.4	0.42	0.08	58	16	145	54
15 mei	SON-T	2.8	0.6	0.42	0.10	64	10	160	44
15 mei	RD-1	2.9	0.4	0.48	0.09	66	7	143	23
15 mei	RD-2	2.9	0.4	0.43	0.09	65	7	154	31
15 mei	BL-1	2.9	0.3	0.41	0.07	69	11	172	34
15 mei	BL-2	2.6	0.3	0.44	0.06	61	7	139	19

Bijlage II.

Bepaling LAI

De LAI moest worden geschat zonder planten te vernietigen. Dit werd gedaan door bladeren te tellen en dit aantal te vermenigvuldigen met het oppervlak van een blad. Dit werd geschat mbv een formule, als volgt:



*Figuur II-1. Formule voor bladoppervlak, bepaald op 13 februari aan 10 bladeren per behandeling. Lengte, breedte en oppervlak zijn gemeten en in grafiek gezet. Hieruit is de volgende formule afgeleid: bladoppervlakte = 0,6292 * lengte * breedte + 4,2796.*

Op verschillende data werd het gemiddeld aantal bladeren per plant bepaald, als volgt: Aan 2 tot 5 stengels per behandeling werd het aantal bladeren per stengel geteld. Hierbij zijn 3 kleine blaadjes geteld als 1 blad, en 2 halfvolgroeide bladeren als 1.

Om het aantal bladeren per m² te bepalen, is het aantal bladeren onder de splitsing vermenigvuldigd met 2,5 (het aantal planten per m²). Het aantal bladeren aan een stengel boven de splitsing is vermenigvuldigd met 7,5 (het aantal stengels per m²). Hieruit volgde het totaal aantal bladeren per m².

Uit gemeten lengte en breedte werd het bladoppervlak berekend met bovenstaande formule.

Vervolgens is een aanpassing uitgevoerd door te veronderstellen dat een kwart van de bladeren voor slechts 80% volgroeid was.

Nauwkeurigheid

De betrouwbaarheid van bovenstaande methode is geschat door te vergelijken met een betere maar arbeidsintensievere methode op 13 februari. Dit was meten van veel bladeren in een bladoppervlaktemeter. Het verschil tussen de twee bepalingen was gemiddeld 13% (naar boven en beneden). Bovenstaande methode is verder gebruikt.

Bijlage III.

Belichtings Effectiviteit

Inleiding

In 2007/2008 waren er heel hoge verwachtingen tav LED, omdat rood licht meer effectief zou zijn voor fotosynthese dan SON-T licht. Er werd gesproken over LED-factor, die aangaf dat LED-licht X keer zo efficiënt is als SON-T, enzovoorts. In deze proef praten we niet over factor, maar over het relatieve effect van LED tov SON-T. Hier wordt een neutrale naam gebruikt, nl Belichtings Effectiviteit (BE). Daarnaast kan ook de term Systeem Effectiviteit (SE) worden gebruikt voor vergelijking van systemen in veel opzichten verschillend zijn.

Definitie

Vergelijking van LED en SON-T belichting kan als volgt gedaan worden:

$$\text{Belichtings Effectiviteit} = BE = \text{effectiviteit van LED} / \text{effectiviteit van SON-T}$$

BE kan betrekking hebben op de efficiëntie van alleen de lampen, bv

1. hoeveelheid fotonen in relatie tot elektriciteitsgebruik

Maar BE moet betrekking hebben op plantprocessen, bv fotosynthese of productie, bv

2. Fotosynthese in relatie tot hoeveelheid fotonen
3. Fotosynthese in relatie tot elektriciteitgebruik
4. Productie in relatie tot hoeveelheid fotonen
5. Productie in relatie tot elektriciteitgebruik

Gram per mol

De meest relevant benadering is productie in relatie tot hoeveelheid fotonen die het gewas heeft ontvangen (optie 4). Dus productie (kg/m²) gedeeld door licht (mol/m²). Dit resulteert in 'gram per mol'. BE wordt dan als volgt berekend:

$$\text{Belichtings Effectiviteit} = \text{gram per mol onder LED} / \text{gram per mol onder SON-T}$$

'Gram per mol' kan alleen goed worden uitgewerkt als méérproductie versus extra hoeveelheid licht die ontvangen is, bij gelijke intensiteit van LED en SON-T. Het mag niet berekend worden over het totaal van ontvangen licht. De productie is dan voor slechts een deel afkomstig van belichting, en BE is dus 'verdund' (te laag).

Ook werkt de berekening niet als de lichtniveaus van LED en SON-T ongelijk zijn. Veel groeiprocessen hebben een niet-lineaire response, maar een kromlijng verband. Dit is de wet van de afnemende meeropbrengst: het lichteffect neemt af naarmate het lichtniveau hoger is ('verzadigingseffect'). Dus het effect van méér licht is groter bij laag lichtniveau dan bij hoog lichtniveau. Een vergelijking van effectiviteit van lampen valt dan gunstiger uit voor de behandeling met de laagste lichtintensiteit. Daarom is het van belang dat de lichtniveaus gelijk zijn. De non-lineariteit speelt dan geen rol, en BE wordt nauwkeuriger bepaald.

Dus BE moet worden berekend uit data bepaald bij ongeveer gelijke lichtniveaus:

$$\text{Belichtings Effectiviteit} = \frac{\text{gram meerproductie per mol extra LED licht}}{\text{gram meerproductie per mol extra SON-T licht}} = \frac{\text{gram per mol bij LED}}{\text{gram per mol bij SON-T}}$$

'Basisproductie'

Om 'meerproductie' te weten moet de 'basisproductie' bekend zijn. Dit is de productie in ONBELICHT. Ook de hoeveelheid basis licht (natuurlijk licht) en de hoeveelheid bijbelichting moet bekend zijn. Dit is alleen het geval wanneer een proef gedaan is met behandelingen 'onbelicht', SON-T en LED. De onbelichte behandeling geeft de basisproductie, zodat de meerproductie door LED en SON-T kan worden bepaald. Bij ontbreken van exacte informatie over basis- en meerproductie (of over basislicht en extra licht), is het mogelijk om gebruik te maken van gewasgroeimodellen waarin de effecten van LED en SON-T op procesniveau bekend zijn. Hiermee kunnen verschillen in belichting, klimaat en/of teeltmaatregelen 'weggerekend' worden, en meerproductie geschat. Dit kan dan gebruikt worden om te komen tot een zo goed mogelijke schatting van de BE.

Periode

Ook van belang is de periode waarover BE wordt berekend. Belichting gebeurt vooral in de donkerste maanden tot april of mei. De productie is in het begin gering, en in de zomer heel hoog, wanneer de belichting allang gestopt is. Het is niet wenselijk om een willekeurige korte periode te beschouwen of om een bepaalde periode weg te laten (bv de aanvangsperiode wanneer wel wordt belicht maar niet geoogst). De periode moet zo gekozen worden dat de vergelijking eerlijk en zinvol is. Op zijn minst moet de beschouwde periode worden vermeld, en het verdient aanbeveling om een weging te maken over de hele duur van de bijbelichting.

Aanpassingen en optimaliseren

Door bijbelichting verandert niet het licht. Soms zijn bewust veranderingen aangebracht, bv hogere plant- of stengeldichtheid of hogere plantbelasting, of extra warmte is toegediend. Dit optimaliseren van teeltomstandigheden wordt gedaan om optimaal gebruik te maken van de belichting. Optimalisatie kan leiden tot tamelijk verschillende teeltomstandigheden, zodat vergelijking moeilijker wordt. Een goed simulatiemodel kan een verschil in teeltomstandigheden 'wegrekenen' om toch een schatting van BE te kunnen maken.

Systeem Effectiviteit (SE)

Het is van belang dat de omstandigheden zoveel mogelijk gelijk zijn, zodat de vergelijk het meest nauwkeurig is. Het gaat om plantdatum, ras, source/sink verhouding (plant- of stengel-dichtheid, plantbelasting), belichtingsniveau, -periode, -duur, klimaat, teeltwijze, warmtetoediening of afvoer, input water & voeding.

Naarmate meer omstandigheden verschillend waren, wordt niet alleen het belichtingseffect maar effecten van de teeltsystemen vergeleken, en kan systeem effectiviteit genoemd worden.

$$\text{Systeem Effectiviteit} = SE = \frac{\text{meerproductie per hoeveelheid input van teeltsysteem LED}}{\text{meerproductie per hoeveelheid input van teeltsysteem SON-T}}$$

Hierbij zou het moeten gaan om de totale in- en output. Totale input kan omvatten energie totaal (elektriciteit, gas), en eventueel ook water, kunstmest, en zelfs arbeid. De totale output kan zijn productie, en ook stroom. Dit wordt een bedrijfseconomische analyse, en de enige bruikbare eenheid is Euro.

Conclusie

Wanneer een 'factor' wordt geclaimd voor effectiviteit van LED belichting, hoort daarbij vermeld te worden hoe die is berekend: over welke periode; of er een referentie was; in hoeverre de lichtniveaus en teeltomstandigheden gelijk waren; op welk wijze eventuele modelberekeningen zijn gedaan; en in welke eenheden de in- en output is berekend. Als alleen het effect van het licht op de productie wordt vergeleken (gram per mol) kunnen we spreken van Belichtingseffectiviteit (BE). Dit werkt alleen als de lichtniveaus ongeveer gelijk waren, en als zowel basislicht als basis productie bekend zijn uit een onbelichte behandeling. Dit lukt alleen in goed opgezette proeven.

In het andere uiterste zijn alle omstandigheden anders. Dan is er sprake van Systeem Effectiviteit (SE) van het ene teeltsysteem tov het andere, en kan alleen een vergelijking gemaakt worden op basis van in- en output (bv in Euro's).

Bijlage IV.

Foto's

Visuele beoordeling op 27 januari 20



Behandeling 1



Behandeling 2



Behandeling 3



Behandeling 4



Behandeling 6

Foto IV-1. Koppen van het gewas op 27 januari 2009, van opzij gezien. In behandeling 4 was de kop 'plat', en het bovenste blad was donkergroen (niet 'blond'). In behandeling 3 had ook beide kenmerken, maar mindere sterk als bij behandeling 4.

Vervolg Bijlage IV



Behandeling 1



Behandeling 2



Behandeling 3



Behandeling 4



Behandeling 6

Foto IV-2. Koppen van het gewas op 27 januari 2009. Zelfde als op vorige pagina, maar nu van bovenaf gezien.

Vervolg Bijlage IV

Op 13 februari werd beoordeeld of de aanpassing van de belichting op 27 januari effect had gehad.



Behandeling 1



Behandeling 2



Behandeling 3



Behandeling 4



Behandeling 5



Behandeling 6

Foto IV-3. Koppen van het gewas op 13 februari 2009, van opzij gezien. Planten in behandeling 4 leken grotendeels hersteld sinds 27 januari, d.w.z. de kop was niet meer zo 'plat'.

Vervolg Bijlage IV



Behandeling 1



Behandeling 2



Behandeling 3



Behandeling 4



Behandeling 5



Behandeling 6

Foto IV-4. Koppen van het gewas op 13 februari 2009. Zelfde als vorige pagina, maar nu van bovenaf gezien.

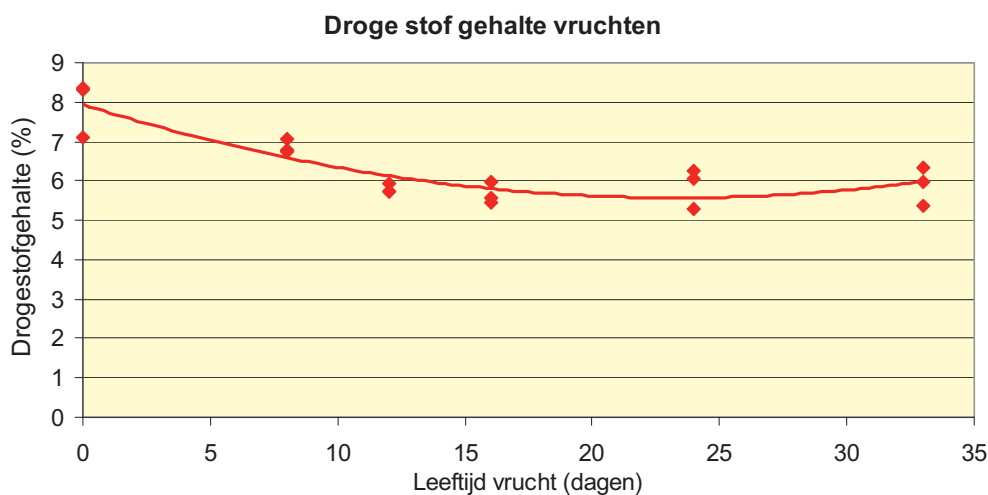
Bijlage V.

Drogestofgehalte vruchten tijdens ontwikkeling

Het droge stof gehalte van vruchten, en het verloop ervan tijdens de ontwikkeling, is van belang voor simulatie van de productie. Daarom zijn vers- en drooggewicht van vruchten bepaald in verschillende ontwikkelingsstadia. Op 12 maart zijn in het vak ONBL drie representatieve pas gezette kleine vruchten meegenomen en 50 vruchtjes gelabeld met datum van zetting. De geselecteerde vruchten waren 2 cm groot. Vervolgens werden vanaf 18 maart iedere 4 dagen 3 vruchten door de teler geoogst en gewogen, en de oogstdatum werd genoteerd op het label. Iedere vrucht werd afzonderlijk verpakt in plastic wikkelfolie. Later werden de vruchten gedroogd en het drooggewicht bepaald. Uit de datum van zetting en datum van oogst werd de vruchtleeftijd berekend. Op 14 april is deze bepaling door de teler beëindigd. Het droge stof gehalte van oogstbare vruchten is voldoende bekend, te weten 6 - 7 % voor groene vruchten en 9 % voor gekleurde (rode) vruchten (Janse, Maaswinkel, 2009, pers. comm.).

Tabel 10. Versgewicht, drooggewicht en droge stof gehalte van vruchten in verschillende stadia van ontwikkeling. Datum zetting 12 maart.

Datum oogst	Leeftijd	Vers gewicht (gram)	Droog gewicht (gram)	Droge stof gehalte (%)
12 maart	0	3.6	0.28	7.92
20 maart	8	30.0	2.06	6.87
24 maart	12	61.5	3.58	5.79
28 maart	16	93.9	5.34	5.68
5 april	24	134.5	7.99	5.87
14 april	33	171.3	10.16	5.89

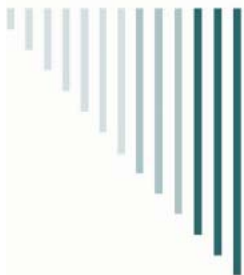


Figuur V-1. Droge stof gehalte van vruchten tijdens hun ontwikkeling.

Deze data zijn aangeleverd aan Plant Dynamics voor simulatie. Ze behoeven geen nadere discussie.

Deel 2:

Scenario analyses LED en SONT



Assimilatiebelichting Paprika

Scenario analyses LED en SON-t

Een studie door A.H.C.M. Schapendonk, C.S. Pot, C. Rappoldt en E. Nederhof

Juli 2009



Kas als Energiebron



Productschap Tuinbouw

Assimilatiebelichting Paprika

Scenario analyse LED en SON-T

Ad Schapendonk¹, Sander Pot¹, Kees Rappoldt² en Elly Nederhof³

¹Plant-Dynamics BV, Englaan 8, 6703 EW Wageningen

²EcoCurves, Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren

³Wageningen UR Glastuinbouw, Violierenweg 1, 2665 MV Bleiswijk

E-mail: ad@plant-dynamics.nl

Plant-Dynamics BV

Wageningen, juli 2009

REFERAAT

A.H.C.M. Schapendonk, C.S. Pot, C. Rappoldt en E. Nederhof, 2009. *Assimilatiebelichting Paprika ; Scenario analyse LED en son-t*. Kasteelt Explorer rapport 2, Plant-Dynamics en EcoCurves, Wageningen. 38 blz.

Documentation of various scenario analyses with the Explorer models of Plant-Dynamics and EcoCurves. The used models are written in FST and Fortran-90. This document contains the analyses of various light application in the horticultural practice of sweet pepper cultivation. It describes computational methods, features of assimilation light application and virtual experiments.

Keywords: Belichting, LED, son-t, simulatie, paprika

ISSN 1111-2222

Dit rapport is gemaakt in opdracht van het Productschap Tuinbouw en het ministerie van LNV in samenwerking met WUR glastuinbouw. We bedanken Wim en Stefan Dingemans voor de medewerking en de discussies gedurende de voortgang van het project.

© 2009 Plant-Dynamics BV en EcoCurves
Englaan 8, 6703 EW Wageningen, Nederland
Kamperfoelieweg 17, 9753 ER Haren (gn), Nederland

e-mail: ad@plant-dynamics.nl

Voorplaat: "Paprika bloem met jonge vrucht bij Dingemans VOF"

© 2009 Wageningen, Plant Dynamics BV en EcoCurves. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Plant Dynamics BV en EcoCurves.

[versie 20 augustus 2009]

Inhoudsopgave

Index figuren	4
Index tabellen	5
1 Samenvatting	7
2 Proces analyse	9
2.1 Inleiding	9
2.1.1 Assimilatielicht, stuurlicht en NIR	9
2.2 Paprika Explorer	10
2.3 Experimentele condities	10
2.4 Behandelingen	11
2.5 Microklimaat	11
2.5.1 CO ₂	11
2.5.2 Temperatuur	12
2.5.3 Lichtintensiteit	13
2.5.4 RV	14
3 Source processen	16
3.1 Experimentele technieken	16
3.2 Licht en Fotosynthese	17
3.3 CO ₂ en fotosynthese	20
3.4 Stress en Fluorescentie (Npq)	21
3.5 Vcmax en Jmax	22
3.5.1 Lichtonderschepping	23
3.6 Huidmondjes geleidbaarheid	23
4 Sink processen	27
4.1 Effecten van belichting op sink processen	27
5 Scenario analyses	29
5.1 Inleiding	29
5.2 Experiment	29
5.3 LED en son-t: is een μ mol een μ mol?	31
5.4 Assimilatenverdeling	36
5.5 Conclusies	37
Bibliografie	37

Lijst van figuren

2.1	Overzichtsfoto van twee LED behandeling	12
2.2	CO ₂ concentratie in rd-1 en son-t behandeling voor enkele kenmerkende situaties	13
2.3	Bladtemperatuur rd-1 en son-t behandeling bij een hoge instraling (a) en lage instraling (b).	14
2.4	Lichtverloop	14
2.5	RV in LED rb1 en SON-T behandeling bij een hoge instraling (a) en lage instraling (b).	15
3.1	Foto van de LiCor-6400 meetapparatuur	17
3.2	Correlatie tussen de fotosynthese en het elektronentransport voor de verschillende LED behandelingen	18
3.3	Fotosynthese als functie van de lichtintensiteit op 21 januari	18
3.4	Fotosynthese als functie van de lichtintensiteit op 4 maart	19
3.5	Fotosynthese <i>capaciteit</i> als functie van de lichtintensiteit op 21 januari en 4 maart	20
3.6	Relatie tussen CO ₂ concentratie en fotosynthese	20
3.7	Stress getal Npq als functie van de lichtintensiteit in verschillende behandelingen	21
3.8	Fotosynthese op 3 karakteristieke dagen	22
3.9	Chlorofyl gehalte en absorptie karakteristieken van bladeren in verschillende behandelingen.	24
3.10	Verloop van de huidmondjesgeleidbaarheid over de dag	25
3.11	Effect van dagverlenging 's ochtends en 's avonds.	25
5.1	De gemeten cumulatieve vruchtproductie en de gesimuleerde geoogste productie	30
5.2	Licht en groei voor de 6 behandelingen.	32
5.3	Assimilatenverdeling als fractie van het totale aanbod voor de 6 behandelingen.	35
5.4	Overzicht van de behandelingen op 21 januari.	36

Lijst van tabellen

1.1	Belichtingsrendement voor de verschillende behandelingen	8
2.1	LED belichting, de verschillende behandelingen	11
3.1	Waarden voor J_{max} en V_{cmax} in de verschillende behandelingen. . .	23
3.2	Chlorofyl gehalten en lichtabsorbtie	23
3.3	Gemeten huidmondjes geleidbaarheid	24
5.1	Relatieve effecten van een verlaagde assimilatenstroom naar de bladeren, berekend voor twee scenario's	33
5.2	Belichtingsrendement voor de verschillende behandelingen	34



Samenvatting

Als onderbouwing van de experimenten bij paprika op het bedrijf van Dingemans, zijn modelmatige evaluaties verricht met het Model Explorer Paprika. Het model berekent de interactie tussen planteigenschappen en microklimaat in de tijd met realistische terugkoppelingen op allerlei processturingen.

In tabel 1.1 zijn de effecten van de behandelingen doorgerekend met de gemeten klimaatdata (zie paragraaf 2.2) op basis van de gemeten plantprocessen. De berekeningen werden gemaakt met het model Explorer Paprika over de periode vanaf planten op 24 november 2008 tot 20 april 2009. De start van de assimilatiebelichting was op 23 december.

Behandelingen:

son-t; ($62 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), rd-1; LED-rood-blauw ($45 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), rd-2; LED-rood-blauw ($45 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s} + 4$ uur voor zonop), bl-1; LED-blauw ($20 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), bl-2; $20 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (LED-blauw overdag + 4 uur voor zonop).

De totale groei van het gewas (eerste kolom tabel 1.1) in de rd-1 behandeling is hoger dan in de son-t behandeling. Dit werd echter niet vertaald in een hogere vruchtproductie (kolom 3). Uiteraard moet hier de lagere lichtintensiteit van de rd-1 behandeling in rekening worden gebracht, waardoor rd-1 toch beter presteert dan son-t in het vruchtgewicht per mol PAR (kolom 5). Uit de analyses blijkt dat een sterk generatieve gewas in rd-1 later omsloeg in een snellere vegetatieve groei als gevolg van de slechte uitgroei van de vruchten, die het gevolg was van een hoge plantbelasting eerder in het seizoen. De effecten werden versterkt door langere belichting (rd-2 en bl-2).

De onbelichte teelt en de beide bl-behandelingen hadden een slechte zetting. Een opvallend positief effect van de bl-1 behandeling en in mindere mate ook de bl-2 behandeling, later in het seizoen, werd veroorzaakt door twee onafhankelijke effecten op de berekende gewasfotosynthese: 1 een toename van het bladoppervlak en lichtonderschepping en 2 een stimulering van de huidmondjesgeleidbaarheid en de fotosynthese capaciteit.

De verschillen in totale groei ($\text{g ds}/\text{m}^2$) komt uiteraard voor een groot gedeelte weer terug in de verschillen tussen de vruchtopbrengsten (vrucht $\text{kg vers}/\text{m}^2$). De verschillen in groei tussen de LED en son-t behandelingen zijn klein (minder dan 11% tussen de hoogste (rd-1) en de laagste opbrengst (bl-2)).

Voor son-t en rd-1 was de berekende toename van de vruchtproductie tov Onbelicht 27% en 10%. Andere behandelingen bleven daarbij achter. De son-t behandeling profiteerde van de goede plantbalans waardoor een hoge oogstindex (gram vrucht/

Tabel 1.1. *Belichtingsrendement*

rd-1 LED-rood (overdag). rd-2: LED-rood (overdag + 4 uur voor zonop). bl-1: LED-blauw (overdag). bl-2: LED-blauw (overdag mee + 4 uur voor zonop). G ds/m² is de totale drogestof productie over de periode van 24 november 2008 tot 20 april 2009. Mol PAR is de totale lichtsom. Vrucht totaal is totaal versgewicht (geogst plus aan de plant). Harvest Index is Drogestof naar vruchten, gedeeld door de drogestof naar de totale plant.

	g ds/m ²	PAR mol/m ²	Vrucht totaal kg vers/m ²
Onbelicht	1337	1088	5.36
son-t	1432	1266	6.86
rd-1	1524	1217	5.86
rd-2	1397	1247	5.23
bl-1	1434	1146	4.96
bl-2	1319	1180	5.56

	Harvest Index	Gram geogst per mol PAR
Onbelicht	0.76	3.96
son-t	0.81	4.65
rd-1	0.77	5.13
rd-2	0.75	4.38
bl-1	0.79	4.80
bl-2	0.80	4.49

g totale groei) werd gerealiseerd. Dit is toe te schrijven aan het feit dat de relatief hoge lichtintensiteit van de son-t ervoor zorgde dat het gewas beter in balans was bij de geobserveerde hoge generatieve vraag, dan in de LED behandelingen.

De vruchtproductie per mol PAR (totaal assimilatielicht+daglicht) is het hoogst in de rd-1 en bl-1 behandelingen. De verschillen zijn echter klein. Alle lichtbehandelingen hadden een hogere oogst per mol PAR dan de onbelichte behandeling.

HOOFDSTUK 2

Proces analyse

2.1 Inleiding

De toepassing van LED-technologie staat sterk in de belangstelling vanwege het verwachte hogere energierendement, de verminderde uitstraling van warmte aan de voorzijde en de praktische mogelijkheid om de lichtbron in het gewas te brengen. Toepassing van LED's vraagt niet alleen aanpassing van de belichtingsstrategie maar vraagt om een nieuwe manier van telen. Om te voorkomen dat voor elke aanpassing nieuw experimenteel onderzoek moet worden verricht is een aanpak op procesniveau noodzakelijk. Het opsplitsen van de productie in sleutelcomponenten is niet alleen noodzakelijk maar ook heel goed te combineren met een praktische aanpak op lokatie, mits er een goede selectie wordt gemaakt van de belangrijkste processen. In dit geval zijn dat: de fotosynthese, verdamping en huidmondjesgeleidbaarheid, bladafsplitsing, zetting en uitgroei duur van de vruchten.

2.1.1 Assimilatielicht, stuurlicht en NIR

Uit eerdere onderzoeken leek paprika positief te reageren op LED-belichting door het ontbreken van kortgolvig infrarode straling (NIR) en mogelijk ook door stuurlicht effecten. De verwachting is dat kennis van de processen kan leiden tot een gerichte gefaseerde inzet van assimilatiebelichting en een gelijkmatiger productie patroon. Er zijn echter twijfels over de hooggespannen verwachtingen, met name op het gebied van de door fabrikanten aangegeven hoge quantum efficiëntie. De doelstelling van de scenario analyses met behulp van het Explorer Paprika model is drieledig:

1. Eenduidig vaststellen of de golflengte van het gebruikte assimilatie licht directe effecten heeft op de productie van het gewas.
2. vaststellen of er onverwachte verschillen zijn in plantarchitectuur of ontwikkelingsprocessen van de plant, die kunnen worden toegeschreven aan stuurlicht effecten.
3. vaststellen van de effecten van de fractie NIR in de son-t belichting en het ontbreken daarvan in de LED belichting.

De eerste doelstelling werd getoetst door vergelijkingen te maken tussen de opbrengst-scenario's met de werkelijk gemeten verschillen in fotosynthese en lichtabsorptie (hoofdstuk 3).

De tweede doelstelling werd getoetst door vergelijkingen te maken tussen de opbrengstscenario's met gemeten verschillen in blad afsplitsingssnelheden, vruchtzetting en bladgroottes.

De derde doelstelling wordt getoetst door vergelijkingen te maken van de bladtemperatuurverdeling met en zonder NIR in de assimilatiebelichting. De temperatuurverdeling heeft consequenties voor de assimilatenverdeling en daardoor voor de productie.

Met de geschetste aanpak manier werd een duidelijk beeld worden verkregen van de effecten van de verschillende LED behandelingen en son-t belichting zowel op het vlak van assimilatie als op het vlak van stuurlicht.

2.2 Paprika Explorer

Als onderbouwing van de experimenten zijn modelmatige evaluaties verricht met een mechanistisch simulatie model. Het model is mechanistisch omdat het de interactie tussen planteigenschappen en microklimaat in de tijd kan simuleren met realistische terugkoppelingen op allerlei processturingen. Het model bestaat uit twee hoofdruibrieken met daarin de onderliggende deelprocessen. De hoofdruibrieken zijn fotosynthese (en gerelateerde verdamping) ("de source") en groeiprocessen van verschillende plantendelen zoals bladeren, vruchten etc ("de sink").

Centraal in de scenario analyses staat natuurlijk de vraag: is LED belichting efficiënter dan son-t. Niet alleen het effect op de momentane assimilatie is daarbij van belang maar ook de indirecte effecten op assimilatenverdeling en de morfologie van de plant. Een te zware plantbelasting geeft bijvoorbeeld een sterke remming van de vegetatieve groei. Dit vertaalt zich later in een lage assimilatie door een slechte vegetatieve opbouw van het gewas. Deze verstoring van de balans wordt in Paprika Explorer meegewogen.

Het effect van de ontkoppeling van NIR en PAR kan met het model effectief worden geëvalueerd. De efficiëntie van belichting voor de fotosynthese zal toenemen bij hogere temperatuur tot een bepaald optimum. Daarnaast heeft de temperatuur een positief effect op de uitgroeisnelheid van bladeren (betere lichtonderschepping) en de snelheid van vruchtgroei. Zeker in de belichte teelt is temperatuurregeling het stuur waarmee sturing wordt gegeven aan de balans tussen assimilaten aanbod en assimilaten gebruik. Met het Explorer model krijgt deze balans een extra dimensie omdat van beide kanten van de balans de boekhouding wordt bijgehouden.

2.3 Experimentele condities

Kasklimaatgegevens werden gemeten met 2 Growwatch opstellingen. Geregistreerde 5 minuten waarden zijn: bladtemperatuur, PAR (2 metingen per behandeling), luchttemperatuur, CO₂ concentratie, RV, vochtgehalte mat en fotosynthesecapaciteit met plantivity meting. In de loop van het experiment zijn 3 meetperiodes gekozen voor het bepalen van lichtabsorptie, fotosynthese, verdamping en huidmondjesgeleidbaarheid. Deze metingen werden gebruikt om de procesvergelijkingen waaruit het Explorer model is opgebouwd te parameteriseren.

Tabel 2.1. LED behandelingen.

rd-1 LED-rood (dag mee), rd-2: LED-rood (dag mee + 4 uur voor zonop), bl-1 LED-blauw (dag mee), bl-2 LED-blauw (dag mee + 4 uur voor zonop).

nr	Benaming	Behandeling	Aanpassing	$\mu\text{mol PAR}$ 28-jan
1	Onbelicht			
2	son-t	8:00 16:00		62
3	rd-1	8:00 16:00	8:00 16:00	45
4	rd-2	4:00 16:00	8:00 12:00	45
5	bl-1	8:00 16:00		20
6	bl-2	4:00 16:00	8:00 12:00	20

2.4 Behandelingen

De proef met LED belichting in paprika maakte deel uit van de normale productiekas bij vof Dingemans. De proef was opgezet met het idee dat LED ook als stuurlicht kan werken, dwz dat de bepaalde kleur van het LED-licht een bepaald effect kan veroorzaken. De lichtintensiteit hoeft dan niet zo hoog te zijn. Dit zou kunnen leiden tot een energie-efficiënte manier van telen. In deze proef lagen vier proefvelden van 120 m^2 ($15 \times 8\text{ m}$) met LED's: twee velden met rode en twee met blauwe LED's (twee van ieder, om verschillende belichtingsduur te testen). Ter vergelijking was er een vak van 560 m^2 met son-t belichting en een groot vak 'Onbelicht'. De rekken met LED lampen werden verhangen zodat ze steeds ongeveer 50 cm boven het gewas hingen. De intensiteit van de rode LED's was $43\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Dit kwam ongeveer overeen met de lichtintensiteit onder de son-t lampen ter hoogte van de kop van de planten. Overigens bevatten deze rode LED lampen ook 6% blauw licht omdat dit onmisbaar is voor goede plantengroei. De blauwe LED's hadden een veel lagere intensiteit: ca $20\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Het ras was Derby, zaaidatum 13 oktober 2008, plantdatum 24 november, plantdichtheid $2,5\ \text{plant}/\text{m}^2$, en stengeldichtheid $7,5\ \text{per m}^2$.

2.5 Microklimaat

In figuren 2.2, 2.3, 2.4 en 2.5 zijn de klimaatdata over de proefperiode weergegeven.

2.5.1 CO_2

De CO_2 concentratie is constant en hoog gedurende de teelt. In figuur 2.2 is het verloop van de CO_2 concentratie op een aantal karakteristieke dagen weergegeven. De CO_2 concentratie varieerde over de gehele meetperiode tussen 600 en 1500 ppm. De gemiddelde CO_2 concentratie was over de hele periode 964 ppm in de son-t en 1005 ppm in de LED behandeling. De gemeten 5 minuten waarden zijn in het model gebruikt (3.2).



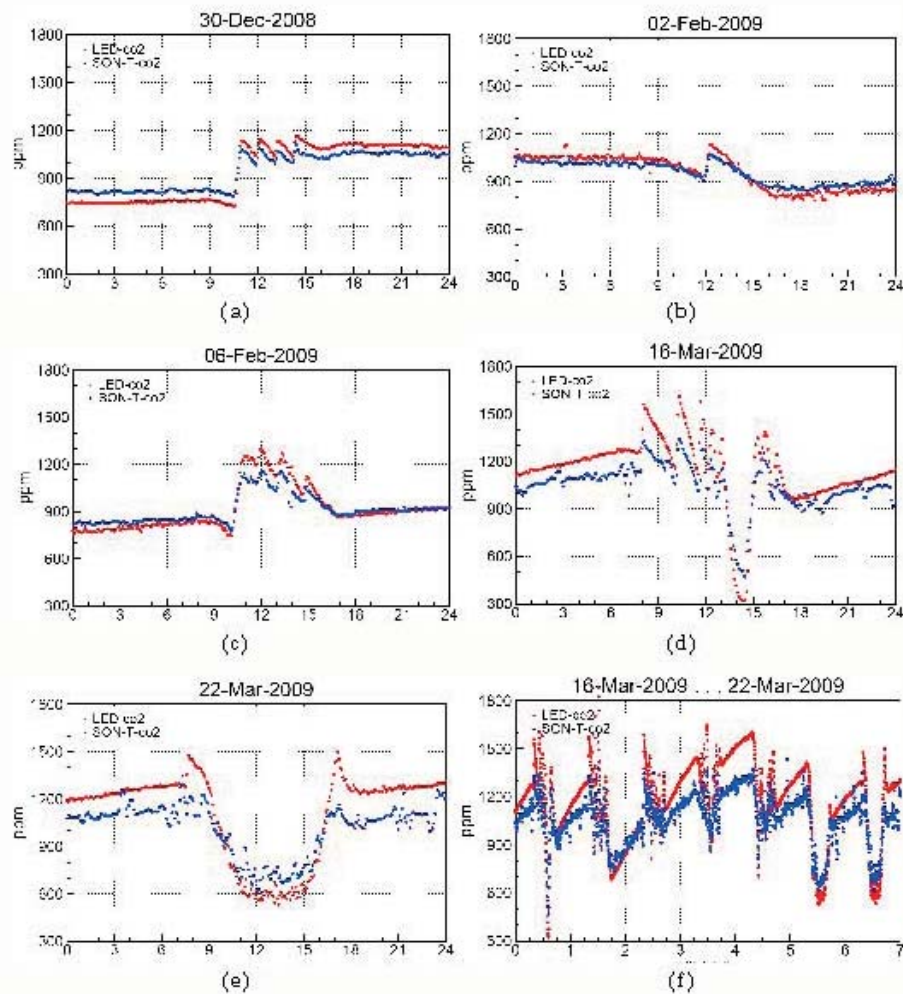
Figuur 2.1. Overzicht van de rood-blauwe LED behandeling (rd-1) met achterin een opname van de blauwe LED behandeling (bl-1)

2.5.2 Temperatuur

Het verloop van de temperatuurverloop van de kaslucht en het temperatuurverloop van topbladeren ligt voor de son-t en LED behandelingen erg dicht bij elkaar. De gemiddelde luchttemperatuur was 19.9°C en de gemiddelde bladtemperatuur was 19.6°C voor de rd-1 en voor de son-t behandelingen waren de waarden 19.6°C , zowel voor LED als son-t. De verschillen zijn dus erg gering. Wanneer we naar de situatie in het licht kijken zien we dat de bladtemperatuur in de son-t behandeling 0.4 graden hoger is dan in de LED behandeling. Dit kleine verschil wordt voor een deel veroorzaakt door de compensatie vanwege de hogere verdamping in de son-t behandeling waardoor de bladtemperatuur minder stijgt dan op basis van het hogere aandeel NIR verwacht wordt. Hoewel de verschillen erg klein zijn, moet een voorbehoud gemaakt worden voor de eventuele effecten op de temperatuur van het groeipunt. Het is mogelijk dat die temperatuur onder son-t meer stijgt dan de verdampende bladeren, en dat dit effecten heeft op bladafplitsing en bloei. De temperatuur van het groeipunt is in dit experiment niet gemeten.

De bladtemperatuur is in de hele teelt in niet boven 28°C geweest. Gecombineerd met een lage VPD en hoge CO_2 concentratie leverde dit een ideaal teeltklimaat op.

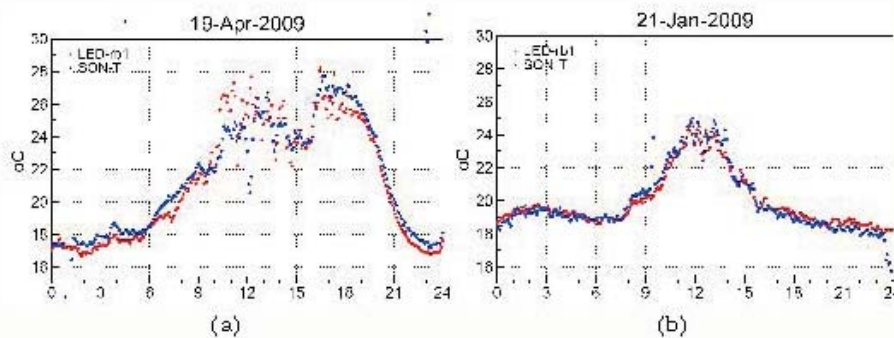
Enkele karakteristieke voorbeelden van het verloop van de bladtemperatuur op een donkere en een erg zonnige dag zijn weergegeven in figuur 2.3.



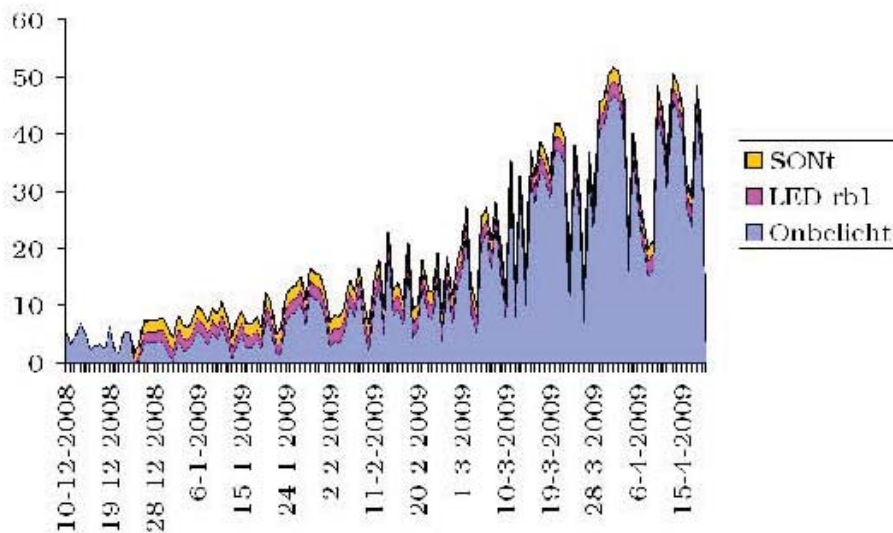
Figuur 2.2. CO₂ concentratie in LED rd-1 en son-t behandeling voor enkele kenmerkende situaties. De CO₂ concentraties in de andere behandelingen zijn vrijwel gelijk aan deze situaties omdat die zich in de directe omgeving bevonden

2.5.3 Lichtintensiteit

Het verloop van de dagelijkse hoeveelheden PAR aan de top van het gewas is in figuur 2.4 weergegeven. De totale lichtsom vanaf de start van de belichting op 23 december tot het eind van de proef op 20 april was in Onbelicht, de rd-1 en son-t respectievelijk 1088, 1217 en 1266. Het is duidelijk dat de relatieve bijdrage van de assimilatiebelichting afneemt in de loop van het voorjaar. In april zijn de bijdragen van het assimilatielicht en zeker de verschillen tussen de behandelingen niet langer significant.



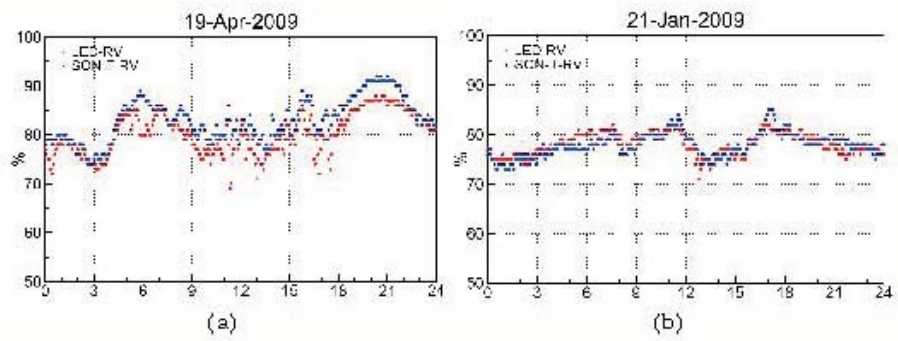
Figuur 2.3. Bladtemperatuur rd-1 en son-t behandeling bij een hoge instraling (a) en lage instraling (b).



Figuur 2.4. mol PAR aan de top van het gewas gedurende de periode met bijbelichting

2.5.4 RV

Ook het verloop van de RV ligt in beide behandelingen erg dicht bij elkaar met gemiddelde etmaalwaarden van 76,9% en 75,7% voor de LEDrb1 en de SON-T behandeling. In de lichtperiodes varieert de RV tussen 75 en 90%. Ook op heldere dagen bleef de RV ruim boven 75% (figuur 2.5a). De RV is bij paprika van belang om het dampdruk deficit van het blad onder controle te houden. Zeker bij wat hogere bladtemperatuur is een hoge RV gunstig, mits er geen ziekten ontstaan en de bladnat periodes zoveel mogelijk worden voorkomen.



Figuur 2.5. RV in LED rbt en SON-T behandeling bij een hoge instraling (a) en lage instraling (b).

Source processen

Een goede karakterisering van assimilatenaanbod (source) is de basis voor een efficiëntere teelt. Deelprocessen voor de source hebben te maken met de aanmaak van suikers en kunnen worden onderverdeeld in: CO₂ binding, elektronentransport in bladgroenkorrels (hier verder aangeduid als de fotosynthese capaciteit of ETR), lichtonderschepping, huidmondjes opening en chlorofyl gehalte. Voor een optimale productie dienen source processen in balans te zijn met processen die de assimilaten verbruiken (sink). Sink processen hebben te maken met de benutting van suikers, zoals de vorming van nieuwe scheuten, bladeren, bloemen en de uitgroei van vruchten. Sink en source processen zijn als twee armen van een balans die in evenwicht moeten zijn om een optimale productie te realiseren.

3.1 Experimentele technieken

De CO₂-opname van bladeren kan direct gemeten worden met behulp van gasanalyse. De LiCor-6400 kan zodanig geprogrammeerd en gekalibreerd worden dat automatisch in ongeveer 40 minuten een licht response curve gemeten wordt, door een reeks van oplopende lichtintensiteiten op het ingeklemde blad te geven (figuur 3.1). Tijdens elke lichtstap worden de actuele assimilatie en de verdamping van het betreffende blad gemeten. Daarnaast wordt de openings toestand van de huidmondjes en de verdamping van de bladeren gemeten. Tijdens de metingen van de licht response curve wordt de CO₂ concentratie op een constante waarde, in dit experiment 1000 ppm, gehandhaafd.

Op vergelijkbare wijze kan een curve gemaakt worden van de fotosynthese bij oplopende CO₂ concentraties. Hiervoor zijn voorzieningen in de LiCor opgenomen die de gewenste CO₂ concentratie realiseren in de luchtstromen aan onder- en bovenzijde van het blad, dat is ingeklemd tussen beide badkamers. De lichtintensiteit tijdens de CO₂ respons curve wordt constant gehouden en was in dit experiment $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ mol PAR}$.

Behalve directe metingen van de CO₂ opname, zijn er spectroscopische technieken die de CO₂-opname niet direct meten maar via de vastlegging van lichtenergie in reducerend vermogen in de elektronentransport processen (ETR). De vastgelegde energie wordt gebruikt om CO₂ in suikers om te zetten. De hellingshoek van de lijn in figuur 3.2 geeft het gemiddeld aantal elektronen dat door Fotosysteem 2 in de chloroplast wordt getransporteerd om voldoende energie vast te leggen voor de reductie van 1 molecuul CO₂. In dit geval is dat ongeveer 6. Dat is een lage waarde en het betekent dat de fotosynthese, gemiddeld genomen, efficiënt verloopt.



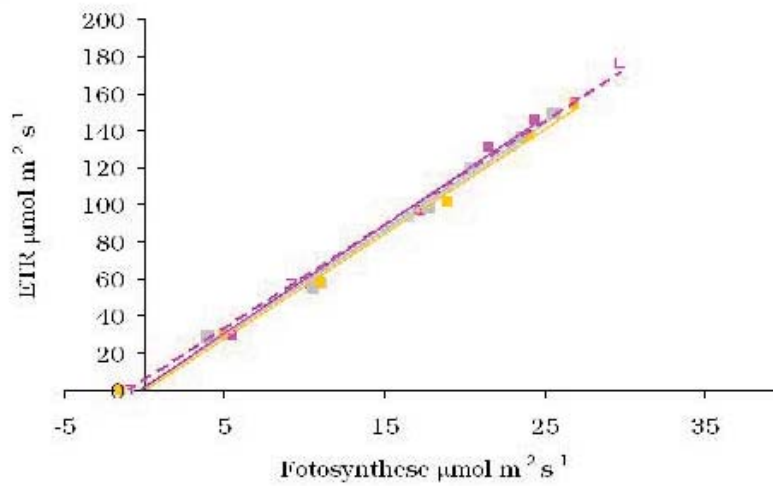
Figuur 3.1. LiCor-6400 meetapparatuur. Assimilatieparameters en fluorescentie (ETR) werden gemeten met de LiCor 6400. In de meet cuvette van deze apparatuur aan boven- en onderzijde van het ingeklemde blad) worden lichtintensiteit, CO₂ concentratie, temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid door een computerprogramma ingesteld en gevarieerd. Hierdoor kan de reactie van de assimilatie op deze veranderingen bepaald worden

Verhoudingsgetallen bij kasgewassen variëren meestal tussen 5 en 10.

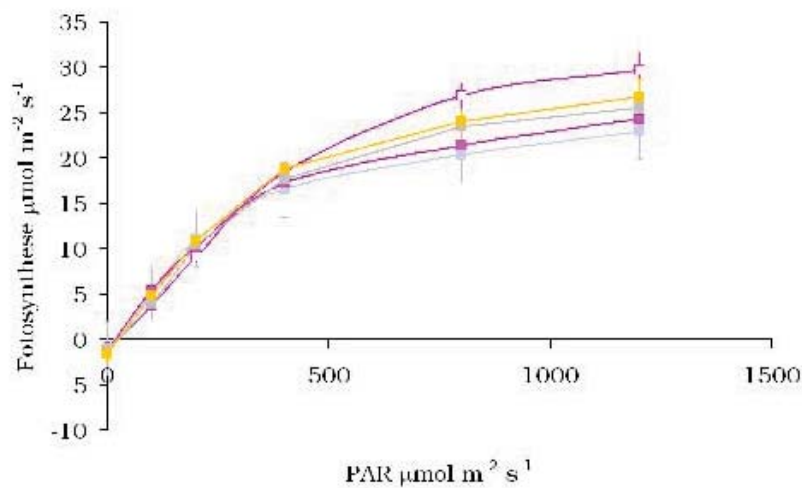
De hoge efficiëntie wordt voornamelijk veroorzaakt door de hoge huidmondjes geleidbaarheid (zie sectie 3.6 en figuur 3.10). In dat geval is er altijd voldoende CO₂ in het blad. In het geval van een lage huidmondjesgeleidbaarheid (Gs) daalt de CO₂ concentratie in het blad, waardoor de fotorespiratie toeneemt en de efficiëntie daalt. Als de situatie in de kas optimaal is zal de relatie tussen ETR en de fotosynthese een keurige rechte lijn zijn. In figuur 3.2 is te zien dat dit inderdaad het geval is en dat er bovendien geen verschillen zijn tussen de behandelingen. In dat geval kan de assimilatie direct worden bepaald uit de fluorescentie data. Een fotosynthese van $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ op bladoppervlakte basis, komt overeen met een groei van 1 gram drogestof per m² blad per uur. Stel dat we een dergelijke fotosynthese gedurende 10 uur kunnen handhaven dan is er voldoende energie vastgelegd om 10 g drogestof te assimileren per vierkante meter blad.

3.2 Licht en Fotosynthese

In figuur 3.3 is voor 5 behandelingen het verband tussen de lichtintensiteit en de netto fotosynthese weergegeven. De metingen zijn verricht op 21 januari, een momentopname waarop voor het eerst werd geconstateerd dat de langedag behan-

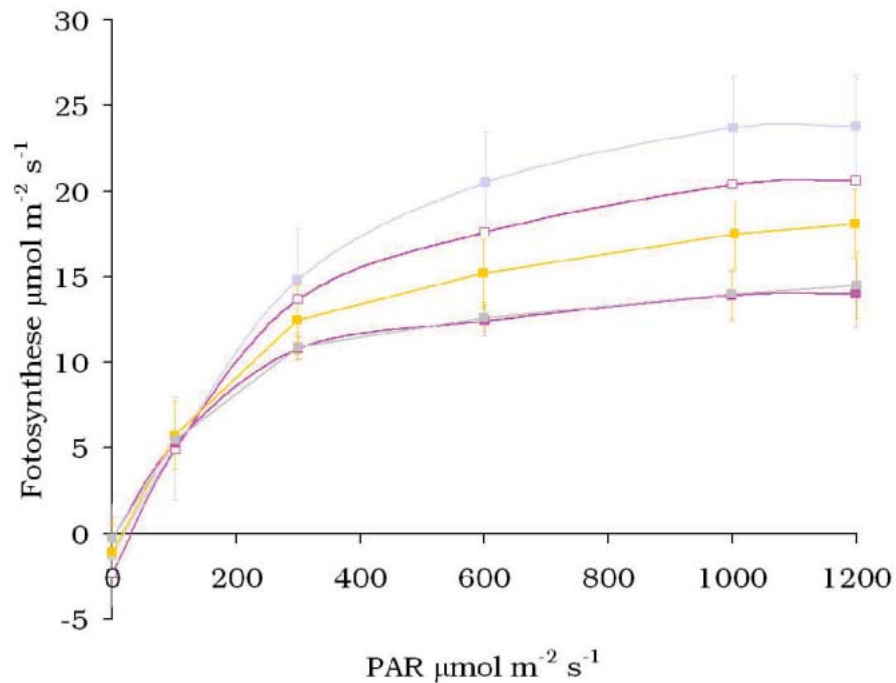


Figuur 3.2. Correlatie tussen de fotosynthese (X-as) en het elektronentransport (Y-as) voor de verschillende LED behandelingen op 21 januari. Er is geen verschil tussen de behandelingen. Dit betekent dat de assimilatie efficiëntie per eenheid licht voor alle behandelingen ongeveer gelijk is. rd-1; violet open symbool, rd-2; violet gesloten symbool, bl-2; blauw; Onbelicht; grijs; son-t; geel.

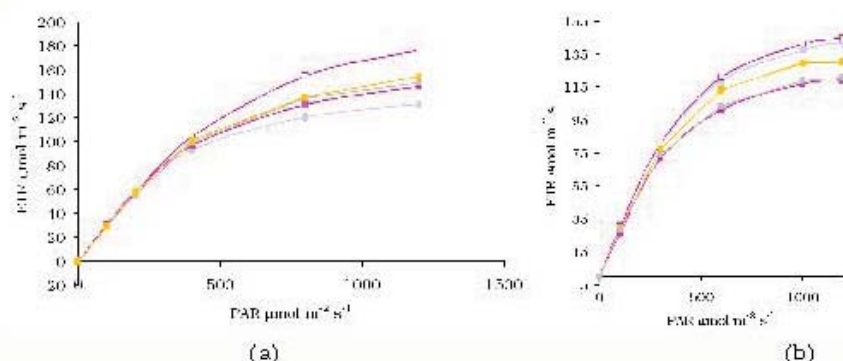


Figuur 3.3. Fotosynthese als functie van de lichtintensiteit in verschillende behandelingen, gemeten op 21 januari. De lichtintensiteit werd gevarieerd en de CO_2 concentratie werd constant gehouden op 1000 ppm. rd-1; violet open symbool, rd-2; violet gesloten symbool, bl-1; blauw; Onbelicht; grijs; son-t; geel

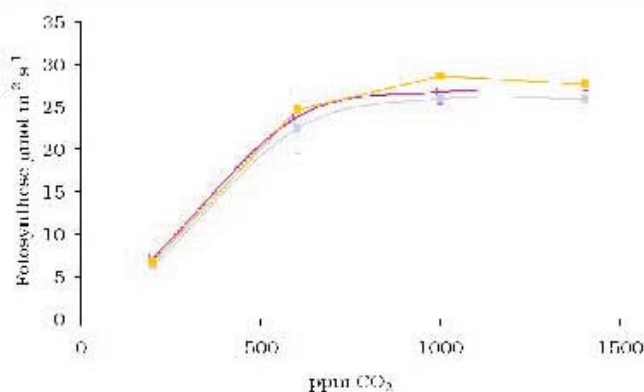
deling (rd-2) tot een problematische groei aanleiding gaf. We constateerden in de betreffende periode dat lang belichten (rd-2) en belichten met blauw (bl-1) een lagere verzadiging van de fotosynthese lieten zien dan de andere behandelingen, inclusief Onbelicht. In de loop van de teelt traden er vooral in de bl-1 behandeling verschuivingen op. Tot 31 januari was de fotosynthese in die behandeling het laagst maar daarna trad een opmerkelijk herstel op. De fotosynthese van de onbelichte teelt en de langedag rd-2 behandeling bleven duidelijk achter (figuur 3.4). Blijkbaar is er een interactie tussen het de kwaliteit van het assimilatielicht en de toename van het daglicht. Wanneer we de scenario analyses bekijken (figuur 5.2) dan valt op dat juist in de periode tussen 21 januari en 4 maart er drastische verschuivingen optreden in de source-sink verhoudingen. In de blauwe behandeling (bl-1) zorgt een sterke toename van het bladoppervlak voor een toename van de lichtonderschepping en daardoor voor een herstel van de zeer lage source/sink balans. Hierdoor kan deze behandeling extra profiteren van de toename in de daglichtintensiteit.



Figuur 3.4. Fotosynthese als functie van de lichtintensiteit in verschillende behandelingen, gemeten op 4 maart. De lichtintensiteit werd gevarieerd en de CO_2 concentratie werd constant gehouden op 1000 ppm. rd-1; violet open symbool, rd-2; violet gesloten symbool, bl-1; blauw; Onbelicht; grijs; son-t; geel



Figuur 3.5. ETR = fotosynthese capaciteit als functie van de lichtintensiteit in verschillende behandelingen, gemeten op 21 januari 4 maart. De lichtintensiteit werd gevarieerd en de CO_2 concentratie werd constant gehouden op 1000 ppm. rd-1; violet open symbol, rd-2; violet gesloten symbol, bl-1; blauw; Onbelicht; grijs; son-t; geel.



Figuur 3.6. Relatie tussen CO_2 concentratie en fotosynthese aan topbladeren 3 behandelingen.

3.3 CO_2 en fotosynthese

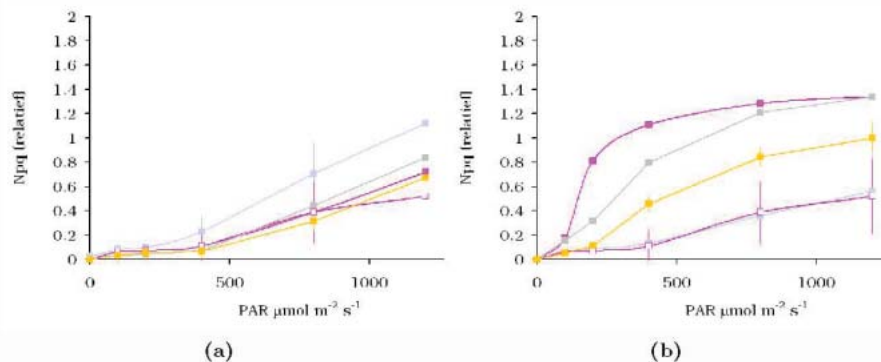
Door de CO_2 concentratie in het meetcuve te variëren werd het effect van de CO_2 concentratie op de fotosynthese snelheid bepaald. In het meetcuve werd de concentratie stapsgewijs opgevoerd: 200 - 400 - 600 - 800 - 1200 - 1600 ppm CO_2 (bij $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR).

De fotosynthese is bij alle behandelingen verzadigd bij 800 ppm. De metingen werden verricht aan bladeren met een relatief hoge huidmondjesgeleidbaarheid (g_s). Als g_s echter laag is, neemt de CO_2 concentratie in het blad af en dan zal de optimale waarde van de CO_2 in de kas uiteraard hoger worden omdat de helling waarmee de fotosynthese toeneemt als functie van de interne CO_2 concentratie in het blad steiler is bij lage concentraties.

3.4 Stress en Fluorescentie (Npq)

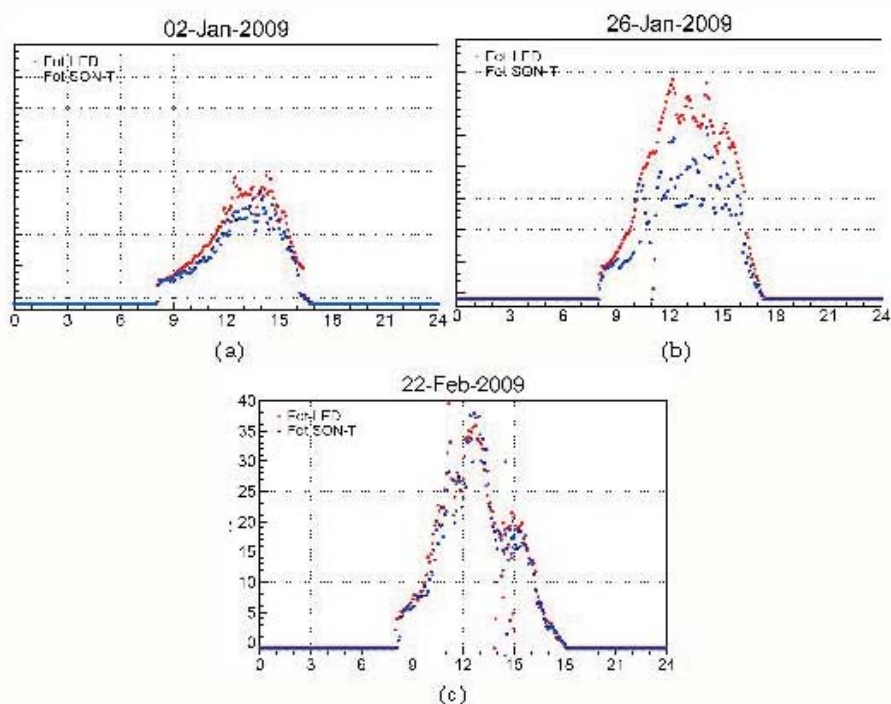
Uit de fluorescentiemetingen kan een interessante parameter worden berekend, die informatie geeft over de vitaliteit van de planten. Deze fluorescentie parameter (Npq) kan worden gezien als het toerental van de fotosynthese motor. Als dit toerental te hoog oploopt terwijl de fotosynthese nauwelijks meer toeneemt, is er sprake van stress. Op basis van het verloop van Npq en de fotosynthese in afhankelijkheid van de lichtintensiteit, kan de optimale lichtintensiteit bepaald worden. Verder kan uit het verloop van die metingen het niveau worden bepaald waarboven een onaanvaardbare stress verwacht mag worden.

Om de relatie tussen Npq en de fotosynthese goed in kaart te brengen zijn meer metingen nodig dan in dit experiment konden worden verricht. In figuur 3.7 is de relatie tussen Npq en de lichtintensiteit weergegeven. Een toename van het toerental (Npq), bij hogere lichtintensiteiten, leidt tot meer stress maar ook tot meer productie. Zolang beiden in evenwicht zijn is de situatie optimaal. De gemeten waarden, variërend tussen 0 en 1,5 duiden op een actief gewas, dat nog weinig slijtage vertoont. We zien ook een grote spreiding tussen de metingen. Deze spreiding wordt veroorzaakt door de stress gedurende periodes dat de VPD_i hoog oploopt. De Npq waarden in figuur 3.7a zijn in de ochtend gemeten en de metingen in figuur 3.7b zijn in de middag gemeten. In de ochtend neemt NPQ geleidelijk toe met oplopende lichtintensiteit. In de middag is er bij lagere lichtintensiteit al snel een sterke toename. Dit duidt op stress en die manifesteert zich vooral duidelijk bij de rd-2 en de onbelichte behandeling. Verdere analyse kan tot verbeterde inzichten leiden die behulpzaam kunnen zijn bij de optimalisatie van de teelt.



Figuur 3.7. Npq als functie van de lichtintensiteit in verschillende behandelingen, gemeten op 21 januari en 4 maart. De lichtintensiteit werd gevarieerd en de CO_2 concentratie werd constant gehouden op 1000 ppm. rd-1; violet open symbool, rd-2; violet gesloten symbool, bl-1; blauw; Onbelicht; grijs; son-t; geel

Met de Plantivity werd de fotosynthese capaciteit in de rd-1 behandeling en de son-t continu geregistreerd. In Figuur 3.8 is het fotosyntheseverloop op een aantal karakteristieke dagen weergegeven. Als gevolg van de hogere lichtintensiteit van de son-t zien we een iets hoger niveau van de fotosynthese capaciteit in die behandeling op 2 januari. Op 26 januari is het verschil tussen de son-t en de rd-1 groter geworden,



Figuur 3.8. Fotosynthese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in de son-t en de rd-1 behandeling op 3 karakteristieke dagen.

terwijl de verwachting zou zijn dat het verschil kleiner is, op basis van de toename in daglicht, waardoor het relatieve belang van de assimilatiebelichting afneemt. Hier is duidelijk sprake van een remming van de fotosynthese in de rd-1 behandeling met als consequentie een afname in de lichtbenuttingsefficiëntie. Later in het seizoen op 22 februari is de terugkoppeling weer opgeheven mogelijk als gevolg van een herstel in de plant balans.

3.5 V_{cmax} en J_{max}

De belangrijkste processen in de fotosynthese zijn de snelheid van CO_2 binding (V_{cmax}) en de fotosynthese capaciteit ($J_{\text{max}} = \text{maximum ETR}$). V_{cmax} werd bepaald uit de CO_2 response curve en J_{max} uit de fluorescentiemetingen.

Er waren kleine verschillen tussen de behandelingen (tabel 3.1), die voor een deel kunnen worden teruggevoerd op verschillen in absorptie van het licht (paragraaf 3.5.1), die door de meting met de LiCor ten onrechte worden toegeschreven aan reële verschillen in J_{max} . rd-1 belichting heeft een 10% hogere maximale efficiëntie (J_{max}). Dit effect komt voornamelijk tot uiting bij hoge lichtintensiteiten in het voorjaar en in de zomer. Voor wintercondities is J_{max} van minder belang. Uit gevoeligheidsanalyses over het groeiseizoen levert de hogere J_{max} slechts 1%–2% hogere productie op.

Tabel 3.1. Waarden voor J_{\max} en V_{\max} ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in de verschillende behandelingen.

	J_{\max}	V_{\max}
Onbelicht	161	75
son-t	174	80
rd-1	196	82
rd-2	171	71
bl-1	171	73
bl-2	147	71

Tabel 3.2. Chlorofyl gehalten, fractie daglicht dat in de betreffende behandelingen wordt geabsorbeerd en de fracties van het aanvullend licht die in de verschillende behandelingen wordt geabsorbeerd.

	Onbelicht	son-t	LED rd-1	LED rd-2	LED bl-1	LED bl-2
Chl a/b mg/m^2)	483	565	500	505	427	419
Abs daglicht	0.76	0.80	0.81	0.84	0.76	0.81
Abs son-t		0.72				
Abs LED-rd-1			0.91			
Abs LED-rd-2				0.96		
Abs blauw-1					0.89	
Abs blauw-2						0.95

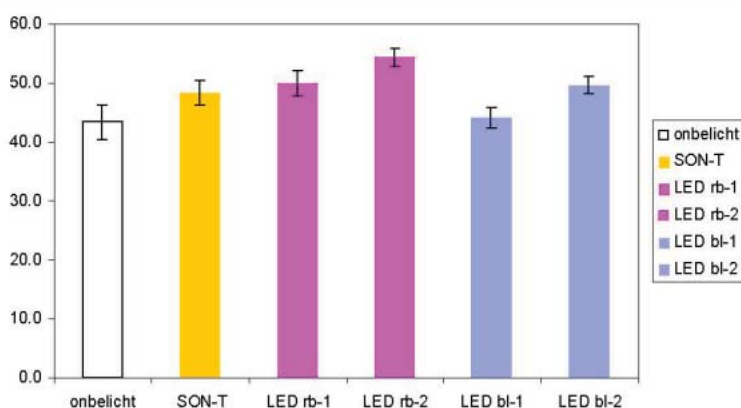
3.5.1 Lichtonderschepping

De fotonen flux van daglicht, LED-belichting en son-t wordt in 3 fracties verdeeld: 400–500 (blauw), 500–600 (groen) en 600–700 (rood). Op basis van de gemeten specifieke absorptie van de bladeren, kan het effect van de belichtingsstrategie op de totale lichtabsorptie van het gewas worden doorberekend. De verschillen in absorptie ontstaan door veranderingen in bladdikte en de aanmaak van verschillende pigmenten.

In tabel 3.2 zijn de waargenomen effecten samengevat. De eerste rij bevat de chlorofyl gehalten en de tweede rij de fractie van het geabsorbeerde daglicht dat in de betreffende behandelingen wordt geabsorbeerd. In de daarop volgende rijen staat de fractie van het aanvullend licht dat in de verschillende behandelingen wordt geabsorbeerd. Deze fractie wordt in het model automatisch opgeteld bij de fractie geabsorbeerd daglicht. De absorptie is het hoogst in de rd-2 gevolgd door rd-1. Een lange belichting (zowel rd-2 als bl-2) stimuleren de chlorofyl aanmaak (figuur 3.9). De reden dat de blauwe behandelingen een relatief hoge absorptie vertonen voor de "eigen" golflengte is waarschijnlijk het gevolg van dikkere bladeren en de synthese van pigmenten die niet direct aan de fotosynthese bijdragen (anthocyanen bijvoorbeeld).

3.6 Huidmondjes geleidbaarheid

De huidmondjes geleidbaarheid is een belangrijke grootte die bepaalt of er voldoende CO_2 kan worden opgenomen in het blad. Een hoge geleidbaarheid betekent



Figuur 3.9. Chlorofyl gehalte en absorptie karakteristieken van bladeren in verschillende behandelingen.

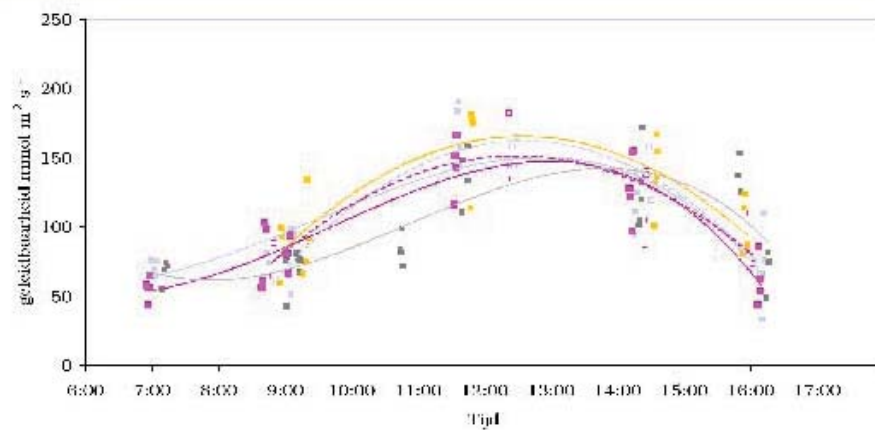
Tabel 3.3. Huidmondjes geleidbaarheid ($\text{mmol mmol}^{-2}\text{s}^{-1}$) gemiddeld voor 2 ochtenden en 2 middagen met tussen haken de standaardafwijking.

	$\text{Gs mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	
	Gemiddeld	Avond
Onbelicht	180, (14)	49.9, (10.8)
son-t	217, (7)	69.5, (10.5)
rd-1	187, (5.4)	40.6, (9.3)
rd-2	117, (19.2)	28.3, (7.6)
bl-1	140, (12.1)	57.9 (7.3)
bl-2	157, (9.8)	57.9 (7.3)

dat de huidmondjes ver open staan en dat de fotosynthese niet beperkt wordt door de opname van CO_2 in het blad. Een hoge geleidbaarheid betekent ook vaak een hoge verdamping. Hierdoor zijn verdamping en fotosynthese (bij gelijk dampdruk deficit) aan elkaar gekoppeld. Over de dag is een duidelijk patroon te herkennen (figuur 3.10) Er is een geleidelijk toename van de geleidbaarheid in de ochtend en een relatief snelle afname na 14:00 u 's middags.

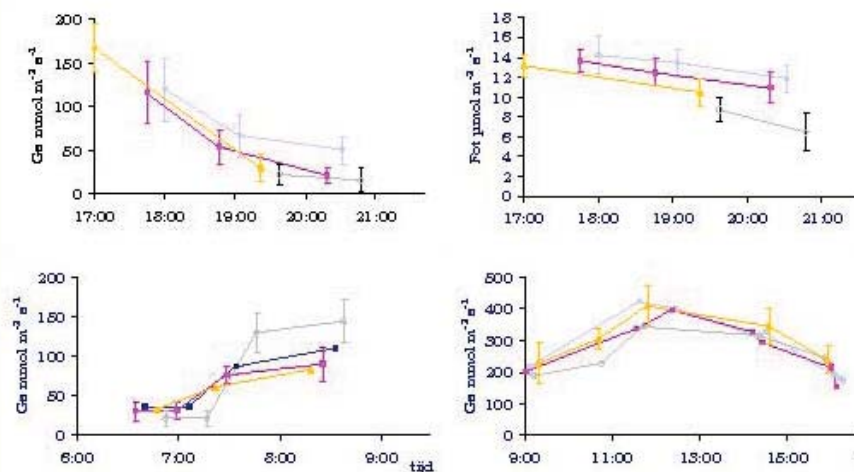
Het patroon was voor alle behandelingen gelijk maar de onbelichte teelt had duidelijk meer moeite om in de ochtend op gang te komen. Dit duidt erop dat assimilatiebelichting een positief heeft op de geleidbaarheid. Deze metingen werden verricht in januari en maart. Later in het seizoen was vooral het daglicht bepalend voor de opening. De geleidbaarheid is het hoogst bij son-t, zowel gemiddeld als aan het eind van de dag.

De langedag belichting laat ook hier een duidelijk negatief effect zien. De geleidbaarheid is aanzienlijk lager dan in de andere behandelingen. De lage geleidbaarheid in de rd-2 behandeling en de hoge Npq (figuur 3.7) wijzen in de richting van een onbalans in de assimilatenvoorziening en een probleem met het verwerken van assimilaten in het blad. Dit wil overigens niet zeggen dat er dan een assimilatenophoping optreedt. Waarschijnlijk is er al een terugkoppeling op de fotosynthese



Figuur 3.10. Verloop van de huidmondjesgeleidbaarheid over de dag. rd-1; violet open symbool, rd-2; violet gesloten symbool, bl-1; blauw open symbool, bl-2;blauw gesloten symbool, Onbelicht; grijs, son-t; geel.

waardoor dat wordt voorkomen.



Figuur 3.11. Effect van dagverlenging 's ochtends en 's avonds. Belichting aan van 06:15 tot 9:15 uur (son-t gaat 1/2 uur later aan en 1/4 uur eerder uit). Energiedoek (40% transmissie) gaat om 8:30 open. Vroeg in de ochtend staan de huidmondjes bij de belichte planten iets verder open t.o.v. Onbelicht. Dit effect is echter gering. Daglicht heeft verreweg het grootste effect op de toename van de geleidbaarheid. Er was geen specifiek effect voor rd-1, bl-1 of son-t. Het effect is het sterkst bij de onbelichte planten.

Om de effecten van dagverlenging in meer detail te bestuderen werd gedurende enkele dagen in de ochtend en de avond extra belicht. De effecten waren zeer gering

(figuur 3.11). Een dagverlenging heeft zowel aan het eind, als aan het begin van de natuurlijke dag enige zin. Opvallend was dat dagverlenging met blauwe LED's het meeste effect sorteerde. Dit komt overeen met de eerdere bevindingen (figuur 3.10).

HOOFDSTUK 4

Sink processen

4.1 Effecten van belichting op sink processen

Als het over lichtkleuren van LED's gaat, dan kom je automatisch op het begrip 'stuurlicht' terecht. (Ver)rood en blauw licht hebben, zoals bekend mag zijn, een totaal verschillende uitwerking. Een toename van verrood licht geeft de plant niet alleen het signaal dat de concurrentiekracht afneemt door beschaduwning van omringende planten. Ook veroorzaakt het signaal dat afgegeven wordt een toename van assimilaten naar de stengel zodat deze sneller kan strekken.

Blauw licht geeft in het algemeen een omgekeerd effect. De planten reageerden op blauw licht met het maken van zonnebladeren en het aanleggen van kortere internodiën. Een verhoogd aandeel van blauw licht in het natuurlijk licht had een duidelijk remmend effect op de celstrekking, waardoor stengels korter waren en bladeren dikker. Ondanks de toename in de bladdikte was er geen sprake van een remming van de bladgrootte. Integendeel het bladoppervlak nam sterk toe in de bl-1 en bl-2 behandelingen, ondanks de lage intensiteit.

Ongetwijfeld is de sturing van de balans tussen assimilaten aanmaak en assimilatenbenutting de sleutel tot teeltoptimalisatie. Deze balans is echter moeilijk te sturen omdat er allerlei vertragingen in het systeem zijn ingebouwd waardoor de effecten van een bepaalde maatregel pas na enkele weken zichtbaar worden en omdat er verschillende terugkoppelingen actief zijn. Denk bijvoorbeeld aan de huidmondjessluiting en de hoge Npq in de rd-1 behandeling (figuur 3.7). Dit geeft vaak aanleiding tot misverstanden en verkeerde beslissingen omdat er geen rekening wordt gehouden met tijdconstanten van de te optimaliseren processen.

Een voorbeeld is de situatie waar een lagere temperatuur in eerste instantie tot een verlaging van de sink leidt maar in tweede instantie tot een toename van de sink omdat de vruchten langer aan de plant blijven hangen. De consequenties en de ingewikkelde samenhang zijn voor niemand makkelijk te voorspellen. Ervaring en gewaskennis blijven bij de inschatting van korte en lange termijn effecten van cruciaal belang. Daarnaast kan het ontwikkelde simulatiemodel, juist bij dit soort ingewikkelde interacties, een helpende hand bieden.

Het grote dilemma bij een belichte winterteelt is enerzijds de wens van een vroege plantdatum om zo snel mogelijk een hoge lichtonderschepping te realiseren en anderzijds het impliciet nadeel dat daardoor een hoge plantbelasting in een periode

valt dat er weinig licht is. De zetting van het aantal vruchten per m^2 per week vertoont een duidelijk verband met de lichtintensiteit. Een vroege start van de teelt heeft tot gevolg dat er in de donkerste periode van het jaar een relatief hoge vraag naar assimilaten is. Dit kan tot verstoring van het groeiritme leiden waardoor een eerste positief effect in februari kan omslaan in een verminderde zetting later in het seizoen.

HOOFDSTUK 5

Scenario analyses

5.1 Inleiding

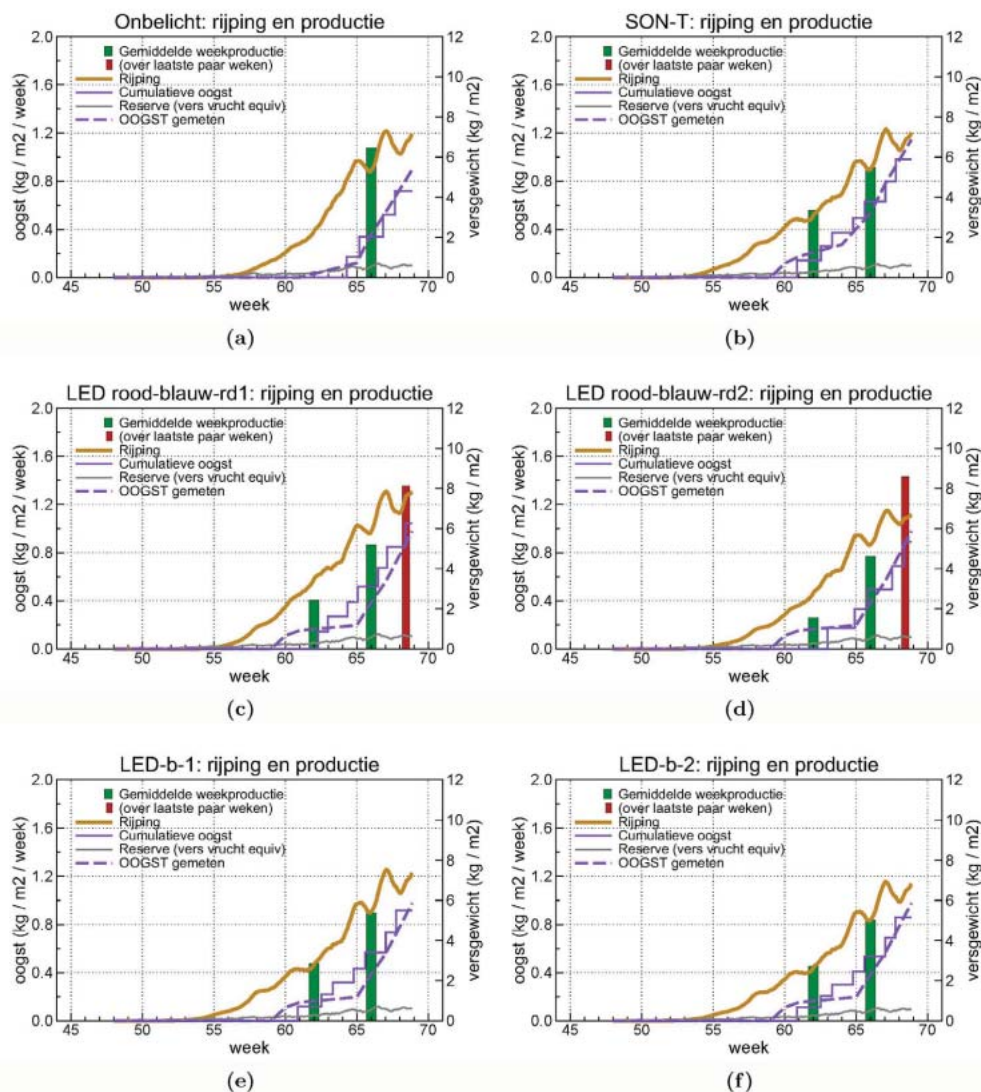
Een goed geparameteriseerd simulatiemodel, is met name een uitstekend gereedschap om *relatieve* effecten op te sporen en daar gaat het meestal om, ook in dit project. De vergelijkingen die met simulatiemodellen gemaakt worden zijn dan “virtuele experimenten”. Virtuele experimenten hebben drie grote voordelen: ze zijn goedkoop, ze zijn snel en het is mogelijk om combinaties van teelteigenschappen en planteigenschappen te maken die experimenteel nooit te realiseren zouden zijn vanwege de kosten en de benodigde tijd.

Het is bijvoorbeeld mogelijk om in enkele minuten voor een bepaald jaar verschillende strategieën voor belichting, temperatuur en gewas management met elkaar te vergelijken. Zo’n aanpak is misschien niet voor 100% betrouwbaar maar wel voor 80% en dat is een lonende exercitie gezien de snelheid en de lage kosten die aan virtuele experimenten zijn verbonden. Bovendien zijn reële praktijk experimenten met een betrouwbaarheid die hoger is dan 80% ook dun gezaaid. Het succes van een simulatiemodel hangt af van de mate van samenhang tussen de beschreven processen, opties voor het operationeel hanteren van teeltmaatregelen (aanhouden van scheuten, verwijderen van bloemen etc.) en de eigenschap om met zo min mogelijk parameters een zo hoog mogelijke betrouwbaarheid te realiseren.

Het model Paprika Explorer berekent de groei en productie van paprika op basis van de effecten die het microklimaat en het teeltmanagement hebben op de fotosynthese en plant balans. De berekeningen zijn dus niet gebaseerd op statistische interacties maar op het samenspel van alle belangrijke processen die bij het tot stand komen van de productie een rol spelen. De sterkte van de Explorer modellen is dat gerekend kan worden voor allerlei combinaties van teeltomstandigheden, mits de sleutelparameters bekend zijn. De Explorer modellen zijn zo geconstrueerd dat er slechts 7 plant- cq rasafhankelijke parameters hoeven te worden bepaald. De belangrijkste zijn gerelateerd aan fotosynthese, blad en plantmorfologie en de sink functie van de vruchten

5.2 Experiment

De belangrijkste conclusies van deze studie zijn weergegeven in tabel 1.1. De rode LED’s hebben het vanaf het begin goed gedaan. De blauwe LED’s vertoonden later verrassende effecten. Te beginnen met de zetting. Zetting was het beste onder son-t en rode LED’s, en het slechtst onder blauwe LED’s en Onbelicht. Hieruit kan



Figuur 5.1. De gemeten cumulatieve vruchtproductie (paarse stippelijntje in $\text{kg} \text{m}^{-2}$) en de gesimuleerde geoogste productie (paarse trapsgewijze lijn, ook op de rechter y-as). De grijze lijn (ook in $\text{kg} \text{m}^{-2}$) is de ophoping van reserves. De beige lijn is de totale plantbelasting (in $\text{kg} \text{m}^{-2}$ per week op de linker y-as). De groene histogram staven geven de gemiddelde weekproductie van twee weken vóór tot twee weken na ieder balkje, in $\text{kg} \text{m}^{-2}$ per week. De simulatie loopt vanaf het planten tot week 74. De nummering van de x-as loopt over de jaargrens heen. Week 68 in de grafiek is dus $68 - 52 =$ week 16 in 2009.

geconcludeerd worden dat er sprake was van een stuurlicht effect, namelijk dat rode LED's de zetting stimuleerden en dat blauwe LED's de zetting remden. De matige zetting in bl-1 en bl-2 werd ook deels veroorzaakt door de lage lichtintensiteit, want bij blauwe LED's was de intensiteit minder dan de helft van die bij rode LED's en son-t. Zoals bekend is de vroege zetting bij paprika sterk afhankelijk van licht.

Daarnaast speelt de concurrentie van de vegetatieve groei onder blauw licht een rol.

5.3 LED en son-t: is een μ mol een μmol ?

De voorspelde oogsten komen goed overeen met de werkelijk waargenomen oogsten (figuur 5.1 op bladzijde 30). Dat betekent dat de relaties tussen het microklimaat en de effecten daarvan op de deelprocessen correct zijn beschreven. We houden echter een marge van 10% voor onvoorziene effecten. Met name in de rd-1, de bl-1 en bl-2 behandelingen zien we van week 63 tot week 67 een onderschatting van de productie. De voorspelde lage productie in het model is het gevolg van de snelle bladontwikkeling in die behandelingen.

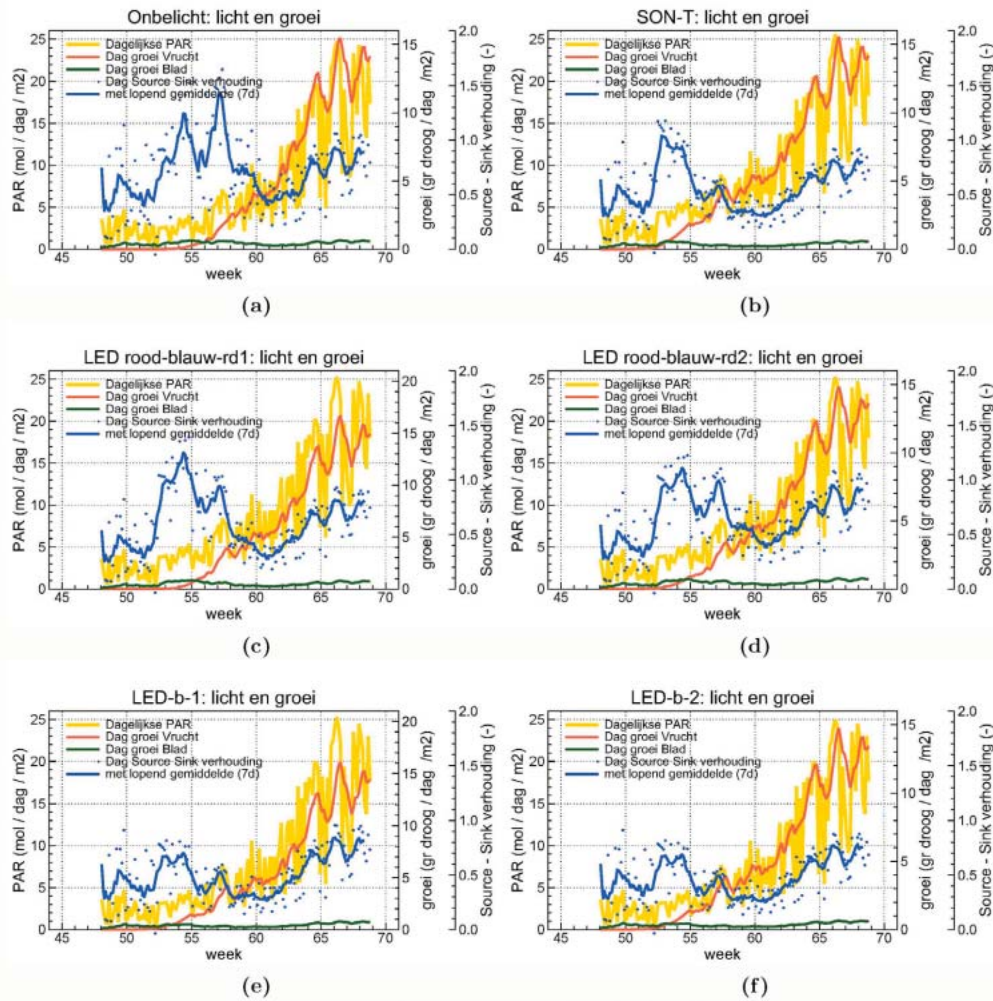
Normaal wordt de eerste bloem in de 4e oksel na de splitsing gezet. Door het lichte weer werd de de eerste bloem al in de derde oksel gevormd. De splitsing is in de oksel van blad 8.

In de son-t is het probleem de slechte bloem en slechte zaadzetting. De vruchten waren kort. Het gewas lijkt het meeste op de rd-1 behandeling. De blaadjes in de kop en de knoppen zijn aan de kleine kant en het gewas staat iets te donker. Deze symptomen duiden op een assimilaten overschot, maar dat kon niet overtuigend worden aangetoond, noch voor de rd-1, noch voor de son-t behandelingen. Eind januari was het onbelichte gewas naar de beoordeling van de kop van de plant het best. De knopvorming en vruchtzetting zijn goed. Deze bevindingen komen goed overeen met de hoge source/sink balans die voor de onbelichte teelt wordt voorspeld (vergelijk figuur 5.2a op bladzijde 32 met de andere behandelingen in figuur 5.2).

Na overleg met de begeleidingscommissie werd besloten om de rd-2 (lange dag) in uren terug te brengen, zodat het gewas zich kon herstellen. Omdat op die manier slechts korte periodes per dag belicht kan worden, gaat het rendement van de installatie omlaag. De reden van de teruggang van het gewas bij langer belichten dient dus te worden achterhaald. Onder blauwe LED's zijn de vruchten wat kleiner en er is een geringe zetting. Dit wordt veroorzaakt door de toename van assimilaten naar nieuwe (grotere en dikkere) bladeren. We kunnen het effect van een vegetatief gewas simuleren door de aantrekkingskracht van de bladeren te verminderen. In tabel 5.1 zijn de resultaten weergegeven van 15% minder assimilaten naar de bladeren, wat ongeveer overeenkomt met de waargenomen extra bladproductie in de genoemde behandelingen.

Het effect is over de hele linie positief maar vooral in de rd-1, de bl-1 en de bl-2 behandelingen. Een lagere assimilatenstroom naar de bladeren zou dus een positief effect hebben gehad. De source /sink balans wordt groter. Overigens betekent dit dat later in het voorjaar het effect kan omslaan. Meer blad geeft bij hogere lichtintensiteiten namelijk een hoger rendement dan bij relatief lage lichtintensiteiten. De blauwe LED velden en vooral de onbelichte planten hadden de laagste productie tot het einde van de belichtingsperiode rond 10 april. Maar in week 21, circa 6 weken na afbouwen van de belichting, werd een positief na-ijl effect zichtbaar. Nog steeds had son-t de hoogste cumulatieve productie, maar één van de blauwe LED vakken had een enorme sprong voorwaarts gemaakt. De cumulatieve productie was bijna net zo hoog geworden als die van de son-t. Dit is vooral te verklaren door het al genoemde effect van het grote bladoppervlak bij de blauwe LED's, wat de onderschepping van het daglicht in het voorjaar verhoogde. Dit verbeterde de zetting en vervolgens de productie.

De uiteindelijke analyse liet in grote lijnen zien dat geen van de vier LED behandelingen een positief resultaat opleverde tov de son-t. Dit betekent niet dat er geen



Figuur 5.2. Licht en groei voor de 6 behandelingen.

perspectief is voor het gebruik van LED's. In tegendeel. De sterke effecten op de groei onder blauw bieden aanknopingspunten om gericht te sturen. Dan moeten er meer kennis zijn over stuurlicht en de timing van sturing. Dit na-ijl effect werd ook daadwerkelijk waargenomen (zie WUR verslag)

De positieve effecten van LED belichting tov son-t zijn minimaal wanneer we zonder kennis van sturingsprocessen te werk gaan. Eventuele positieve effecten worden later in negatieve zin gecompenseerd. Zelfs de hogere absorptie van rode LED's heeft betrekkelijk weinig effect, evenals de aan- dan wel afwezigheid van NIR in het spectrum (tabel 5.1).

Tabel 5.2 is voor een deel al in de samenvatting gepresenteerd en accentueert de hierboven beschreven conclusies. De totale groei van het gewas (eerste kolom) in de rd-1 behandeling is hoger dan in de son-t behandeling. Dit wordt echter niet vertaald in een hogere vruchtproductie (kolom 3). Uiteraard moet hier de lagere

5.3. LED en son-t: is een μ mol een μ mol?

33

Tabel 5.1. Relatieve effecten van een verlaagde assimilatenstroom naar de bladeren, een situatie waarbij de LED's eenzelfde fractie NIR uitstralen als son-t en een situatie waarbij de extra absorptie van rood licht op 0 is gesteld.

	15% minder blad	NIR = NIR son-t	Geen extra absorptie
Onbelicht	-3%		
son-t	1%		
rd-1	7%	1%	1,5%
rd-2	0%	1%	1,6%
bl-1	5%	1%	
bl-2	6%	1%	

lichtintensiteit van de rd-1 behandeling in rekening worden gebracht, waardoor rd-1 toch beter presteert dan son-t in het vruchtgewicht per mol PAR (kolom 5). Uit de analyses blijkt dat een sterke generatieve ontwikkeling in rd-1 later omsloeg in een snellere vegetatieve groei als gevolg van de slechte uitgroei van de vruchten, die het gevolg was van de te hoge plantbelasting eerder in het seizoen. De effecten werden versterkt door langere belichting (rd-2 en bl-2).

De onbelichte teelt en de beide bl-behandelingen hadden een slechte zetting. Een opvallend positief effect van de bl-1 behandeling en in mindere mate ook de bl-2 behandeling, later in het seizoen, werd veroorzaakt door twee onafhankelijke effecten op de berekende gewasfotosynthese: 1 een toename van het bladoppervlak en lichtonderschepping en 2 een stimulering van de huidmondjesgeleidbaarheid en de fotosynthese capaciteit.

De verschillen in totale groei ($g\ ds/m^2$) komt uiteraard voor een groot gedeelte weer terug in de verschillen tussen de vruchtopbrengsten (vrucht $g\ droog/m^2$). De verschillen tussen de LED en son-t behandelingen zijn klein (minder dan 11% tussen de hoogste (rd-1) en de laagste opbrengst (bl-2)).

Voor son-t en rd-1 was de berekende toename van de vruchtproductie tov Onbelicht 27% en 10%. Andere behandelingen bleven daarbij achter. De son-t behandeling profiteerde van de goede plantbalans waardoor een hoge oogstindex (gram vrucht/ g totale groei) werd gerealiseerd. Dit is toe te schrijven aan het feit dat de relatief hoge lichtintensiteit van de son-t ervoor zorgde dat het gewas beter in balans was bij de geobserveerde hoge generatieve vraag, dan in de LED behandelingen.

De vruchtproductie per mol PAR (totaal assimilatielicht+daglicht) is het hoogst in de rd-1 en bl-1 behandelingen. De verschillen zijn echter klein. Alle lichtbehandelingen hadden een hogere oogst per mol PAR dan de onbelichte behandeling.

In de laatste kolom van tabel 5.2, is het effect van de behandelingen uitvergroot door een weging te maken van de extra hoeveelheid vruchtgewicht tegen mol extra PAR. Dit uitvergrooten, in feite vergelijken we kleine relatieve verschillen met een heel grote basisproductie (bij daglicht), moet goed worden geïnterpreteerd. Een groot effect op een heel klein verschil levert immers niet veel op ook al lijkt het getal groot. Een relatief negatief effect van -77 in de rd2 en +18 in de rd-2 behandelingen betekent bijvoorbeeld dat het licht 77% minder effectief is in rd-2 en 18% effectiever in rd-1, dan wanneer we dezelfde intensiteit met natuurlijk daglicht hadden bereikt. Het absolute verschil tussen beide behandelingen is echter slechts 11% (1167/1051 in kolom 3).

De hoge meeropbrengst van de blauwe LED behandeling (bl-1) wordt niet veroor-

zaakt door assimilatielicht maar door stuurlicht, en is toe te schrijven aan de hogere lichtonderschepping.

Tabel 5.2. *Belichtingsrendement*

rd-1 LED-rood (overdag). rd-2: LED-rood (overdag + 4 uur voor zonop). bl-1: LED-blauw (overdag). bl-2: LED-blauw (overdag mee + 4 uur voor zonop). G ds/m² is de totale drogestof productie over de periode van 24 november 2008 tot 20 april 2009. Mol PAR is de totale lichtsom. Vrucht totaal is totaal versgewicht (geoogst plus aan de plant). Harvest Index is drogestof naar vrucht gedeeld door de drogestof totaal. Het Rendement is de extra vruchtproductie die geproduceerd wordt per mol extra licht als percentage van de daglicht efficiëntie.

	g ds/m ²	PAR mol/m ²	Vrucht totaal kg vers/m ²
Onbelicht	1337	1088	5.36
son-t	1432	1266	6.86
rd-1	1524	1217	5.86
rd-2	1397	1247	5.23
bl-1	1434	1146	4.96
bl-2	1319	1180	5.56

	Harvest Index	Gram vrucht per mol PAR	Gram vrucht extra / mol PAR extra (%) Rendement
Onbelicht	0.76	3.96	nvt
son-t	0.81	4.65	-14
rd-1	0.77	5.13	+18
rd-2	0.75	4.38	-77
bl-1	0.79	4.80	+98
bl-2	0.80	4.49	-72

Het perspectief voor LED applicatie bij paprika moet vooral gezocht worden in een gerichte stuurlichttoepassing. Om daar inzicht in te krijgen is kennis nodig van de veranderingen in de plant balans.

Een analyse van die balans is weergegeven in figuur 5.2. De sinkregulatie van de vruchten is voor paprika erg belangrijk. De vruchten krijgen in het model een ontwikkelingsafhankelijke potentiële groeisnelheid toegewezen. De assimilaten worden vervolgens verdeeld naar rato van de berekende sinks. Er worden dus 2 variabelen berekend: 1 de potentiële sink-afhankelijke vruchtgroei en 2 de gerealiseerde vruchtgroei. Op die manier kun je dus zien of het gewas sink- dan wel source-gelimiteerd is.

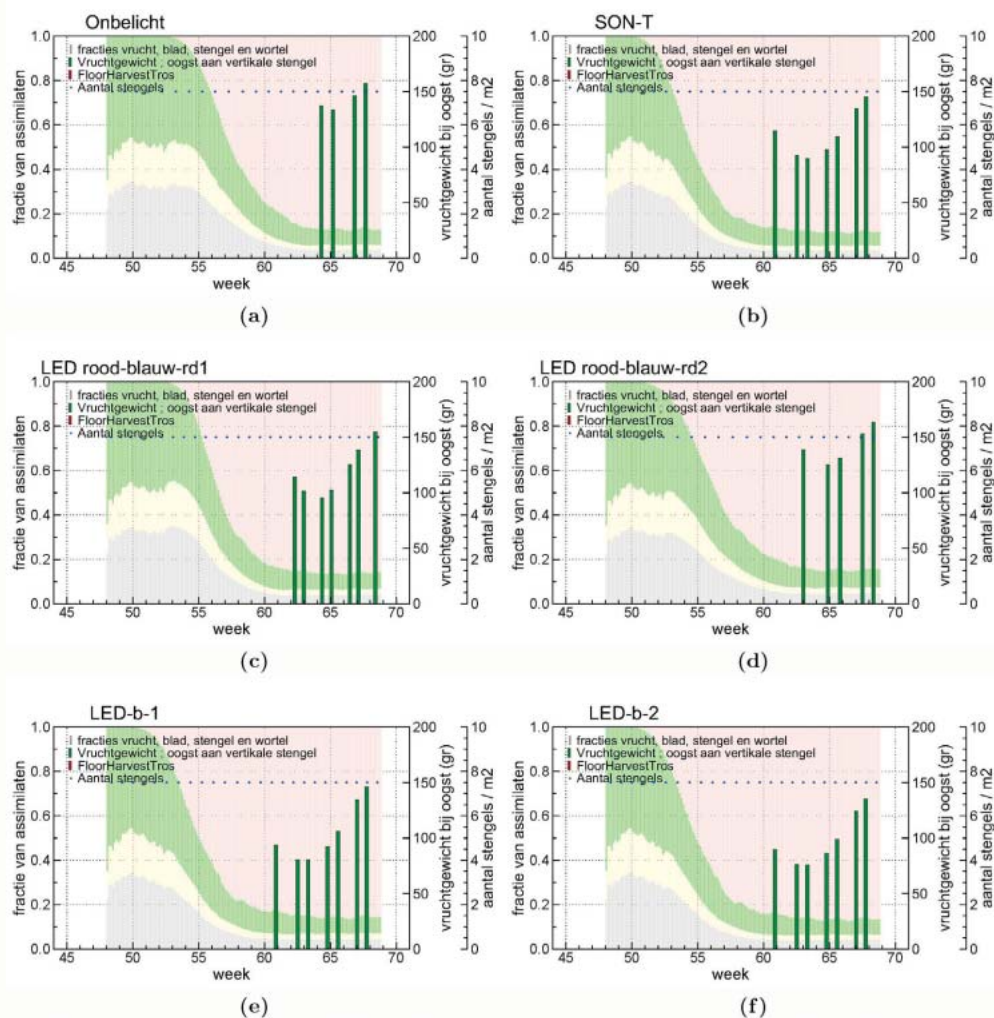
De blauwe stippen geven inzicht in de verhouding tussen assimilaten-aanbod en assimilaten-benutting en de blauwe lijn is het voortschrijdend weekgemiddelde. Een waarde groter dan 1 (op de meest rechtse as) betekent dat er meer assimilaten worden aangemaakt dan er nodig zijn voor de groei van de verschillende sinks en een waarde kleiner dan 1 betekent dat er een tekort is. Een goede operationele situatie is een balans tussen 1.3 en 0.7.

Over de gehele lijn zien we een positieve balans tot week 56 (eind januari). Daarna verslechtert de situatie aanzienlijk. Er ontstaat in februari en maart een tekort aan

5.3. LED en son-t: is een μ mol een μ mol?

35

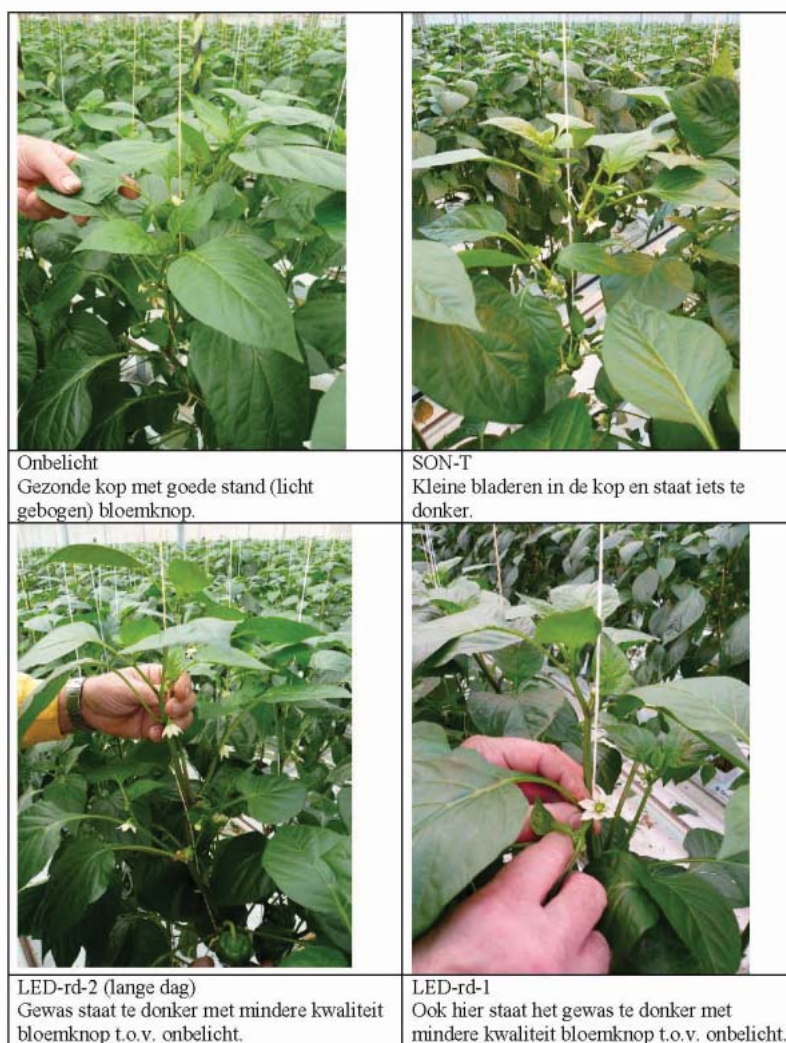
assimilaten in vergelijking met de behoefte. Pas na week 62 (half maart) zien we een herstel. Opvallend is het verschil tussen de de onbelichte behandeling (figuur 5.2a) en de behandelingen bl-1 en bl-2 (figuur 5.2e) en figuur 5.2f). Ondanks het feit dat de totale belichting in de onbelichte behandeling lager was, zien we toch in de maanden december en januari een positieve balans in vergelijking met beide blauwe LED behandelingen. Dit betekent dat de assimilatenvraag door de vruchten wordt gestimuleerd door de blauwe LED's. De figuur geeft de fractie van assimilaten die aan wortel (grijs), stengel (lichtgroen), blad (groen) en vrucht (rood) worden toebedeeld. De histogrammen geven het gesimuleerde gemiddelde vruchtgewicht. De groene stippellijn geeft het aantal stengels per m^2 weer.



Figuur 5.3. Assimilatenverdeling als fractie van het totale aanbod voor de 6 behandelingen.

5.4 Assimilatenverdeling

Planten onder rd-2 zijn te generatief. Het lijkt een zomergewas met veel bloemknoppen (figuur 5.4). De internodiën zijn relatief kort. De bladeren zijn relatief klein. Het gewas is niet “blond”, de bladeren hebben niet de gewenste lichte kleur. LED-rd-1 (korte dag) voldoet beter aan de gewenste kleurstelling van de jonge bladeren. In de LED-rd-2 behandeling was op de plantbelasting op 22 januari te hoog door de stimulering van de zetting. Er hingen op dat moment 3-4 vruchten per plant.



Figuur 5.4. Overzicht van de behandelingen op 21 januari.

In Figuur 5.3 is een overzicht gegeven van de verschuiving in de assimilatenverdeling over blad, stengel wortel en vruchten gedurende het seizoen. De ontwikkeling van de vruchtgrootte is eveneens gesimuleerd en weergegeven in de groene balken. De bladgroei is relatief gering onder son-t en rode LED, terwijl planten onder blauwe LED relatief het grootste bladoppervlak hadden. Het gesimuleerde vruchtgewicht in de bl-1 en bl-2 behandeling blijft duidelijk achter bij de andere behandelingen.

5.5 Conclusies

LED's hebben, met het huidige rendement, weinig directe toegevoegde waarde voor de teelt van paprika in vergelijking met son-t, tenzij er fasegericht gestuurd wordt met stuurlicht. Dit is een reële optie die in het seizoen 2009-2010 zal worden onderzocht. We zien namelijk mogelijkheden voor onderzoek naar specifieke stimulering van nieuwe sinks bij paprika met tussenbelichting. Paprika is een gewas waarvan al in de zeventiger jaren is aangetoond dat een grote assimilaten vraag van de vruchten de fotosynthese stimuleert (Gonzlez-Real *et al.*, 2008; Nielsen & Veierskov, 1988). Op die manier kan extra vruchtzetting een vliegwielerwerking hebben omdat de het een trigger is voor een hogere fotosynthese, wat omgekeerd weer positief werkt op de snelheid van vruchtgroei. Hoe lichtkleur en intensiteit op deze wisselwerking ingrijpen is een interessant vraagstuk dat juist bij paprika een zeer positieve uitwerking kan hebben. Met de rd-1 en bl-1 behandelingen kan gestuurd worden op ontwikkeling en op de verwachte gevolgen voor onderschepping en efficiëntie van (dag)licht.

Het effect van een hogere absorptie van rood licht is praktisch verwaarloosbaar. De effecten van het ontbreken van NIR zijn bijzonder gering.

Referenties

- Gonzlez-Real, M., Baille, A., Liu, H., 2008. Influence of fruit load on dry matter and n-distribution in sweet pepper plants. *Scientia Horticulturae* 117, 307 – 315.
- Nielsen, T. H., Veierskov, B., 1988. Distribution of dry matter in sweet pepper plants (*capsicum annum l.*) during the juvenile and generative growth phases. *Scientia Horticulturae* 35, 179 – 187.